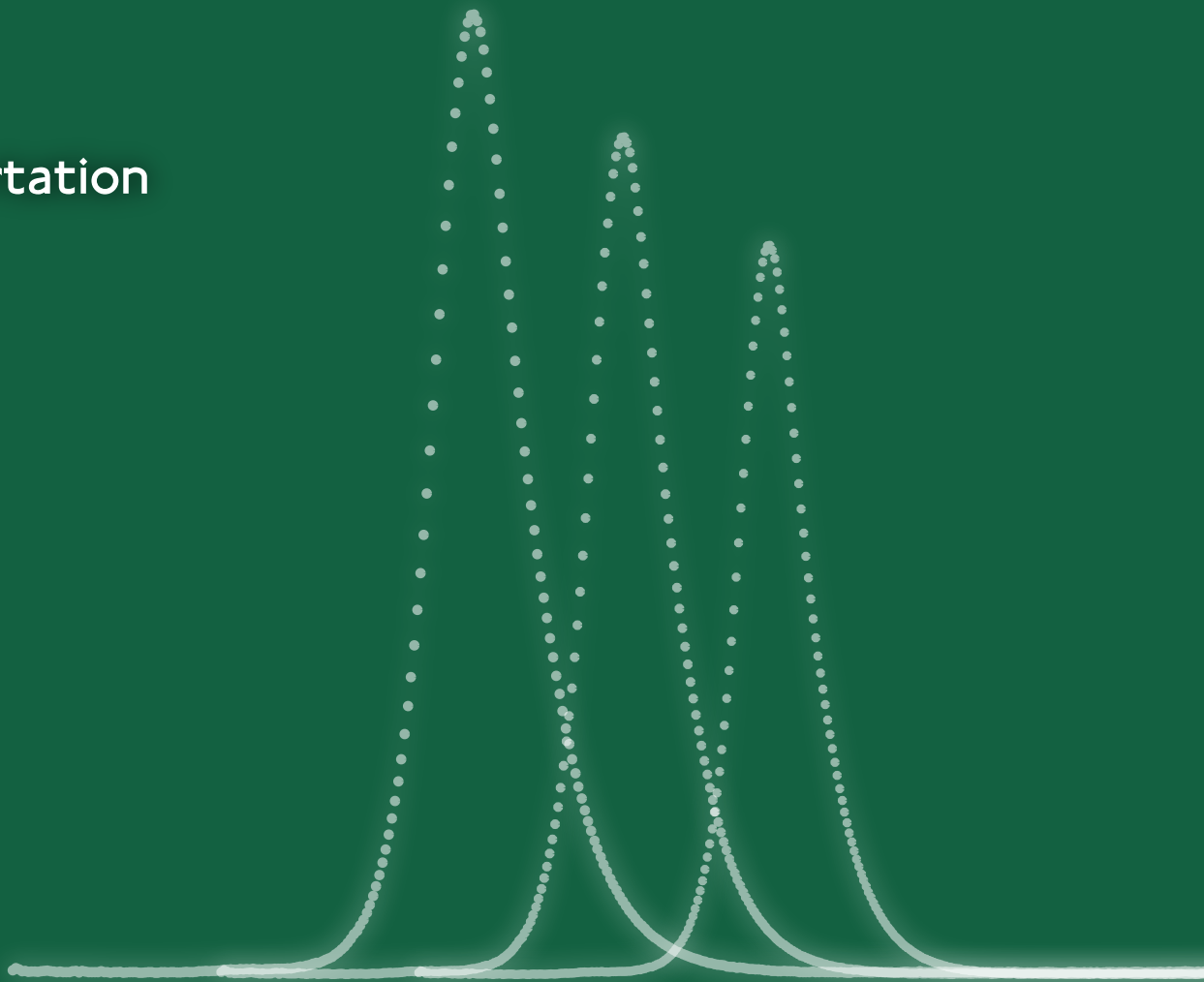


Maria Haas

Untersuchungen zur Herstellung und  
optischen Charakterisierung  
von großflächigen transparenten  
Silikonschichten am Anwendungsbeispiel  
der dielektrischen Stapelaktoren

Dissertation



**Maria Haas**

Untersuchungen zur Herstellung und optischen Charakterisierung von großflächigen transparenten Silikonschichten am Anwendungsbeispiel der dielektrischen Stapelaktoren

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-43168

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/4316>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints.

E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



# Untersuchungen zur Herstellung und optischen Charakterisierung von großflächigen transparenten Silikonschichten am Anwendungsbeispiel der dielektrischen Stapelaktoren

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von  
Maria Haas, M.Sc.  
aus Moskau

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Datum der Einreichung: 10.06.2014  
Datum der mündlichen Prüfung: 01.10.2014

Darmstadt, 2015

D17



# Kurzfassung

In den letzten Jahren eroberte die Touch-Technologie das alltägliche Leben. Immer mehr Geräte - wie Smartphones, E-Book-Reader, Tablet PCs, Bedienelemente an diversen Maschinen und Anlagen - werden mit Touchdisplays versehen. Diese beeindrucken mit ihrer Flexibilität und Funktionalität. Die Abwesenheit einer taktilen Rückmeldung oder eines taktil detektierbaren Reliefs erschwert die Nutzung solcher Geräte für Sehbehinderte und senkt die Bedienbarkeit mancher Anwendungen wie z.B. schnelles Tippen. Diese Lücke in der Bedienbarkeit kann durch den Einsatz transparenter dielektrischer Stapelaktoren geschlossen werden. Diese bestehen aus sich abwechselnden leitenden und dielektrischen Schichten. Letztere werden unter anderem aus Silikonen hergestellt.

Die bestehenden Verfahren zur Herstellung der Stapelaktoren sind auf eine Größe von wenigen Quadratzentimetern beschränkt. Der Suche nach Herstellungsverfahren großflächiger (ca. DIN A5) für die Anwendung in transparenten dielektrischen Stapelaktoren geeigneten Silikonschichten ist diese Arbeit gewidmet. Dabei wird das Potential der Druck- und Beschichtungsverfahren ausgenutzt, die eine großflächige Fluidübertragung auf Substrate in Bogen- und Rollenform ermöglichen.

Es werden zunächst die Eigenschaften und die Anforderungen an die Silikone und die Druck- und Beschichtungsverfahren analysiert. Davon ausgehend wird auf theoretischer Basis eine Auswahl von vier Silikonen und drei Verfahren getroffen, die anschließend in allen Kombinationen bei variierenden Prozessparametern zur Probenherstellung herangezogen werden.

Um den Einfluss der Verfahren, der Materialien und der Prozessparameter auf die Qualität der Silikonschichten zu ermitteln, wird eine neuartige optische Charakterisierungsmethode entwickelt. Diese basiert auf den Prinzipien der direkten Schattenabbildung, ist bildgebend und kann bis ca. DIN A4 große Proben vollflächig erfassen. Die Methode wird anhand weißlichtinterferometrischer Messungen überprüft und validiert.

Als Qualitätskriterien werden die Schichthomogenität sowie drei Kategorien von Schichtinhomogenitäten eingeführt. Der Vergleich und die Qualitätsbewertung der unterschiedlich hergestellten Proben erfolgt im Rahmen einer Probandenstudie. Zur Beurteilung der allgemeinen Schichthomogenität wird der Homogenitätswert  $H$  eingeführt, der aus den Bildinformationen der Schattenabbildungen errechnet wird. Anhand dieser Kriterien wird der Einfluss des Herstellungsverfahrens, der Prozessparameter sowie des verwendeten Silikons auf die Schichtqualität ermittelt. Es wird gezeigt, dass Herstellung von dünnen Silikonschichten grundsätzlich mit allen ausgewählten Verfahren und Silikonen möglich ist. Die resultierende Schichtqualität unterscheidet sich dennoch enorm vor allem in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren.



# Abstract

Touch technology has become part of the usual life during the last years. Touch displays are installed in devices such as mobile phones, tablet PCs and e-book readers or as control panels in various machines and equipment. They impress with their flexibility and functionality. However, not giving a tactile response they complicate their usage for visually handicapped users. The absence of a tactile detectable relief like keys or buttons makes some applications difficult like fast typewriting. This usability shortcoming can be solved by dielectric stack actuators which consist of alternating conductive and dielectric layers. The latter can be made of silicones.

Existing manufacturing techniques for dielectric stack actuators are limited to a size of some square centimeters. This thesis discusses the search for a manufacturing technique of large (approximately DIN A5) silicone layers suiting the application of transparent dielectric stack actuators. For this purpose, the high potential of printing and coating techniques is being used, since these techniques enable a large-area fluid transfer onto substrate sheets and rolls.

In the first step, I analysed the properties and requirements of the silicones as well as printing and coating techniques. Based on their intersection and considering the requirements of the dielectric stack actuators, I made a theoretical selection of four suiting materials and three manufacturing techniques. Combining them with each other and varying the process parameters, I manufactured several specimens.

For the investigation of material, manufacturing technique and process parameters' impact on the quality of the specimens, I developed a new optical characterisation method for the silicone layers. This imaging method is based on the principles of the direct shadowgraphy and can capture at once a specimen up to the size of approximately DIN A4. The characterisation method was proved and validated by white-light-interferometry measurements.

I used layer homogeneity as well as three categories of inhomogeneities as quality criteria for the silicone layers. Their comparison and quality estimation were done in a subjective study. For further estimation of the common layer homogeneity, the homogeneity value  $H$  was developed which can be calculated from the image data collected during the characterisation. Applying these criteria, the impact of the used silicone, manufacturing technique and process parameters on the layer quality was estimated. Generally, all chosen manufacturing techniques as well as the chosen silicones enable manufacturing of thin silicone layers. However, the layer quality strongly depends especially on the used manufacturing technique.





# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt. Mein ganz besonderer Dank für die Ermöglichung meiner Promotion gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam, der mich auf diesem Weg geleitet und begleitet hat.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh, Leiter des Fachgebiets Lichttechnik an der Technischen Universität Darmstadt, für sein Interesse an der Arbeit und die aufgewendete Zeit im Zuge des Koreferats.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinen Kollegen vom Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren für die freundliche und angenehme Atmosphäre bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Hans Martin Sauer für die fachlichen Anregungen und Diskussionen. Ich bedanke mich bei Stephanie Hafner, Evgeny Kurmakaev, Duy Linh Nguyen und Thorsten Euler für die Zusammenarbeit bei den Druckversuchen und der Probandenstudie. Bei Karsten Rettig und Manfred Jakobi bedanke ich mich für die technische Unterstützung bei der Fertigstellung des Prüfstandes. Henri Kröling danke ich für die kritische Korrektur meiner Arbeit.

Ebenso bedanke ich mich bei meinen Studenten und studentischen Hilfskräften Anna-Lisa Mautes, Bilge Kagan Arslantürk, Julian B. Zembron, Sebastian P. Reineke, Philipp Hempel, Harald Lezzi, Thomas Stein und Patrick Sauer, die mich in meiner Zeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren begleitet und unermüdlich unterstützt haben.

Ganz herzlicher Dank gilt meinem Ehemann Herrn Dr.-Ing. Martin Haas für die fachliche sowie mentale Unterstützung und für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Ich bedanke mich ganz besonders bei meinen Eltern, die mir das Streben nach hohen Leistungen beigebracht und somit den Anfangsimpuls für die Entstehung dieser Arbeit gegeben haben.

Darmstadt, Oktober 2014



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>1. Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>15</b>
1.1. Umfeld der Arbeit und Motivation . . . . .	16
1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	20
<b>2. Dielektrische Stapelaktoren: Grundlagen und Auswahl der Materialien und Verfahren zur Herstellung</b>	<b>23</b>
2.1. Aktoren für transparente taktile Anwendungen . . . . .	23
2.1.1. Dielektrische Elastomeraktoren . . . . .	24
2.1.2. Arbeitsprinzip und Bauweisen dielektrischer Stapelaktoren . . .	25
2.1.3. Materialienvielfalt bei der Herstellung dielektrischer Aktoren . .	27
2.2. Silikone als Material für dielektrische Stapelaktoren . . . . .	30
2.2.1. Übersicht über Silikone . . . . .	30
2.2.2. Vermischung und Dosierung zweikomponentiger Silikonsysteme .	32
2.2.3. Prozess- und produkttechnische Anforderungen an die Silikone .	34
2.2.4. Auswahl der Silikone . . . . .	36
2.3. Druck- und beschichtungstechnische Herstellung dünner Silikonschichten	37
2.3.1. Übersicht und Auswahl der Druckverfahren . . . . .	37
2.3.2. Übersicht und Auswahl der Beschichtungsverfahren . . . . .	42
<b>3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten</b>	<b>47</b>
3.1. Defekte und Homogenität dünner Silikonschichten . . . . .	47
3.2. Optische Messungen transparenter Silikonschichten . . . . .	50
3.3. Optische Messmethode auf Basis der Schattenabbildung . . . . .	55
3.3.1. Phänomen der Lichtbrechung . . . . .	55
3.3.2. Grundlagen der Schattenabbildung . . . . .	57
3.3.3. Anwendung der Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten . . . . .	60
<b>4. Machbarkeitsstudie zur Methode der Schattenabbildung</b>	<b>65</b>
4.1. Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	65
4.2. Probenauswahl . . . . .	67
4.3. Ergebnisse und Diskussion . . . . .	69
<b>5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung</b>	<b>73</b>
5.1. Herstellung der Silikonschichten . . . . .	73
5.2. Aufbau und Durchführung der Charakterisierung . . . . .	77
5.2.1. Verbesserung des Prüfstands im Vergleich zum Versuchsaufbau der Machbarkeitsstudie . . . . .	77
5.2.2. Der Aufbau des Prüfstands . . . . .	82

5.2.3. Durchführung der Charakterisierung . . . . .	84
5.3. Auswertung der Versuchsdaten und Definition des Homogenitätswerts .	85
<b>6. Diskussion</b>	<b>89</b>
6.1. Diskussion der Charakterisierungsmethode . . . . .	90
6.1.1. Validierung . . . . .	90
6.1.2. Grenzen . . . . .	95
6.1.3. Übertragbarkeit der Charakterisierungsmethode . . . . .	100
6.2. Versuchsergebnisse . . . . .	102
6.2.1. Kategorisierung von Schichtinhomogenitäten und deren Schattenabbildungen . . . . .	103
6.2.2. Visuelle Abmusterung der Schattenabbildungen und der Homogenitätswert als Auswertungswerkzeuge . . . . .	106
6.2.3. Versuchsergebnisse und deren Diskussion anhand der visuellen Abmusterung und des Homogenitätswerts . . . . .	109
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>A. Grundlegende Kameraeinstellungen</b>	<b>137</b>
<b>B. Technische Daten benutzter Silikone</b>	<b>139</b>
<b>C. Zusammengeführte Ergebnisse der Auswertung</b>	<b>141</b>
<b>D. Technische Daten benutzter Gerätschaften</b>	<b>145</b>
D.1. LED . . . . .	145
D.2. Digitale Spiegelreflexkameras . . . . .	145
D.3. Siebdruckmaschine KAMMANN K15Q SL . . . . .	145
D.4. Filmziehgerät ZEHNTNER ZAA 2300 . . . . .	146
D.5. IR-Strahler ELSTEIN HTS/2 . . . . .	146
D.6. Umlufttrockner Vötsch VTL 60/90 . . . . .	147
D.7. COATEMA Smartcoater SC07 . . . . .	147
<b>Technische Quellen zum Anhang</b>	<b>149</b>

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$	Einfallswinkel	[rad, °]
$\beta$	Ausfallswinkel	[rad, °]
$\eta$	dynamische Viskosität	[Pa·s]
$\hat{\rho}$	Korrelationskoeffizient	[-]
$\kappa$	Proportionalitätsfaktor	[-]
$\lambda$	Wellenlänge	[nm]
$\nu$	Querkontraktionszahl	[-]
$\omega$	Rotationsgeschwindigkeit	[rad/s]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Standardabweichung	[-]
$\varepsilon$	relative Permittivität	[F/m]
$\varepsilon_0$	Permittivität des Vakuums	[A·s/V·m]
$\varphi$	Rakelwinkel	[rad, °]
$\xi$	Differenz zwischen Einfalls- und Ausfallswinkel	[rad, °]
$a, b$	Abmessungen der Schattenabbildung und der GSW-Matrix	[Pixel, a.u.]
$C$	Kontrast einer Schattenabbildung	[-]
$c$	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	[m/s]
$d$	Fadenabstand des Siebgewebes	[μm]
$E$	Erwartungswert einer statistischen Variablen	[a.u.]
$F$	Kraft	[N]
$g$	Größe der Probe	[m]
$g'$	Größe der Schattenabbildung	[m]
$H$	Homogenitätswert	[1/Pixel]

## Inhaltsverzeichnis

$h$	Dicke	$[\mu\text{m}]$
$I$	Lichtintensität	$[\text{a.u.}]$
$i, j$	Laufindizes zur Kennzeichnung der Pixelposition	$[-]$
$k$	Abstand zwischen Probe und Schirm	$[\text{m}]$
$l$	Abstand zwischen Lichtquelle und Schirm	$[\text{m}]$
$\dot{m}$	Massenstrom	$[\text{kg/s}]$
$m$	Abstand zwischen Lichtquelle und Probe	$[\text{m}]$
$\vec{n}$	Lot	$[-]$
$n$	Brechzahl	$[-]$
$p$	Mechanischer MAXWELL-Druck	$[\text{Pa}]$
$r, \theta, z$	Räumliches Zylinderkoordinatensystem	$[-]$
$\Delta s$	Auslenkung des Strahlenganges	$[\text{m}]$
$\vec{s}$	Vektor des Lichtstrahls	$[-]$
$t$	Zeit	$[\text{s}]$
$U$	Spannung	$[\text{V}]$
$v$	Rakelgeschwindigkeit	$[\text{m/s}]$
$w$	Fadenstärke des Siebgewebes	$[\mu\text{m}]$
$X, Y$	Zufallsvariablen	$[\text{a.u.}]$
$x, y, z$	Räumliches kartesisches Koordinatensystem	$[-]$

## Abkürzungen

D	Dielektrikum
DEA	dielektrischer Elastomeraktor
E	Elektrode
EAP	Elektroaktive Polymere
FZF	Filmziehen, flach
FZR	Filmziehen, rund
GSW	Graustufenwert
HTV	hochtemperaturvernetzend
ITO	<i>engl.</i> Indium tin oxide (Indiumzinnoxid)

LED	Leuchtdiode, light-emitting diode
OFET	organischer Feldeffekttransistor
OLED	<i>engl.</i> organic light-emitting diode
OPV	organische Photovoltaik
OTFT	<i>engl.</i> organic thin film transistor
PDMS	Polydimethylsiloxan
RFID	<i>engl.</i> radio-frequency identification
RTV	raumtemperaturvernetzend
SD	Siebdruck





# 1. Einführung

In den letzten zwanzig Jahren setzte sich die Datendigitalisierung durch. Computer, Smartphones und Tablets nehmen einen festen Platz im alltäglichen Leben ein. Die Nachfrage nach elektronischen Geräten und Bauteilen stieg kontinuierlich, wie aus den Abbildungen 1.1 und 1.2 ersichtlich ist. Bei der steigenden Nachfrage stellte sich für die Hersteller der elektronischen Geräte die Frage der Weiterentwicklung der Herstellungsprozesse in Richtung Wirtschaftlichkeit und Schnelligkeit. Dabei blieb das hohe Potential der Drucktechnik nicht unbeachtet. Druckverfahren ermöglichen einen Fluidauftrag auf große Flächen bei sehr hohen Geschwindigkeiten. Die Forschung auf dem Bereich der graphischen Druckprozesse, die die Herstellung grafischer Produkte wie Bücher, Zeitschriften, Plakate u.s.w. betreffen, ist weit fortgeschritten. Die Materialien sind an die Maschinen bzw. Verfahren angepasst. Die Umstellung der Drucktechnologien auf neue Produkte, wie elektronische Bauteile, ist mit gewissen Herausforderungen verbunden. Seit Jahren liegt es im Fokus der Forschung, elektronische Bauteile drucktechnisch herzustellen [7, 128]. Eine große Herausforderung dabei ist die Anpassung der Druckprozesse und der Materialien, die ursprünglich nicht für das Drucken, sondern für konventionelle Herstellungsverfahren (Aufdampfen, Sputtern u.a.) gedacht waren. Dies war der Anlass dafür, dass sich die Forschung in der Drucktechnologie stark umorientierte und sich immer mehr mit den Problemen der gedruckten bzw. druckbaren Elektronik auseinandersetzte.

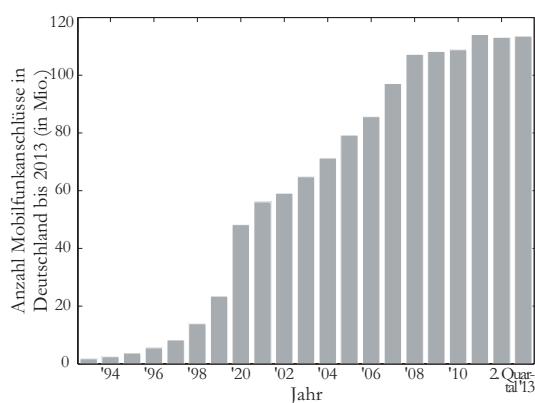


Abbildung 1.1.: Anzahl Mobilfunkanschlüsse in Deutschland bis 2013 (Datenquelle [137]).

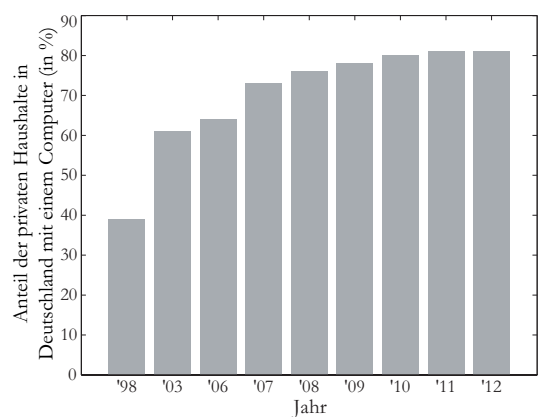


Abbildung 1.2.: Anteil der privaten Haushalte in Deutschland mit einem Computer (Datenquelle [136]).

### 1.1. Umfeld der Arbeit und Motivation

Viele Fragestellungen in der vorliegenden Arbeit entstanden aus dem Forschungsprojekt DETouch „Herstellung und Bedienbarkeit taktiler IO-Displays unter Verwendung dielektrischer Elastomer-Stapelaktoren“, in welches zwei Fachgebiete der Technischen Universität Darmstadt aus dem Maschinenbau (Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren IDD, Institut für Arbeitswissenschaften IAD) und eines der Elektrotechnik (Institut für Elektromechanische Konstruktionen EMK) involviert waren. Im Mittelpunkt des Projekts standen dielektrische Stapelaktoren, die als Bedienelemente mit Eingabe- und Rückmeldefunktionen für eine taktile Anwendung (z.B. ein Touchdisplay) dienen sollten. Die Ausführung der Eingabe- und Rückmeldefunktionen erfolgt dabei durch eine Nachahmung gewöhnlicher Tasten, die durch den Einsatz dielektrischer Stapelaktoren ermöglicht wird. Das Projektvorhaben war breit aufgestellt und beinhaltete unter Anderem Untersuchungen zur taktilen Wahrnehmung des Menschen und zur Weiterentwicklung der Ansteuerungselektronik für dielektrische Stapelaktoren. Das Projektziel für das IDD war die Entwicklung einer neuen Methode zur Herstellung großflächiger (ca. DIN A5) dielektrischer Stapelaktoren auf Basis der Druckverfahren. Ein Teil der Projektergebnisse kann in den Veröffentlichungen der Autorin und der am Projekt beteiligten Personen nachgelesen werden [43, 88, 89] .

Dielektrische Stapelaktoren bestehen aus mehreren sich abwechselnden leitenden und isolierenden (dielektrischen) Schichten. Für die Herstellung der dielektrischen Schichten stand das zweikomponentige Silikon WACKER Elastosil P7670 A/B im Rahmen des Projekts fest. Dieses wurde durch das zum Projektanfang bereits bestehende am EMK entwickelte Herstellungsverfahren bestimmt. Dieses Verfahren besteht aus drei Schritten (vgl. Abb. 1.3):

1. Im ersten Schritt werden zwei Silikonkomponenten A und B des WACKER Elastosil P7670 zusammengeführt und vermischt. Die Mischung wird auf einen runden Teller dosiert, der anschließend geschleudert wird. Das Silikon verteilt sich unter dem Einfluss der Fliehkraft auf dem Teller.
2. Die beim Schleudern entstandene Silikonschicht wird unter Wärmezufuhr vernetzt. Das Silikon ändert dabei seinen Aggregatzustand von flüssig auf fest.
3. Nach der abgeschlossenen Vernetzung wird eine strukturierte Elektrode auf die Silikonschicht aufgebracht. Dies geschieht mit einer Graphitlösung im Sprühverfahren und einer Maske aufgrund der Strukturierung. Das Lösemittel verdunstet rasch und hinterlässt eine dünne leitende Schicht.

Diese Schritte werden solange wiederholt, bis die benötigte Anzahl an Schichten erreicht wird. Mit diesem Verfahren werden am EMK seit geraumer Zeit funktionsfähige Aktoren hergestellt. Allerdings hat dieses Verfahren einen Nachteil: Die Größe der damit herstellbaren Aktoren ist auf wenige Quadratzentimeter begrenzt, was ihren Einsatz bei größeren Anwendungen wie Handys oder E-Reader enorm erschwert. Der Grund dafür ist die hohe dynamische Viskosität des Silikons, die die Herstellung von großflächigen Schichten mit gleichmäßiger Dickenverteilung durch Schleuderverfahren kompliziert. Diese Einschränkung diente als Anstoß zur Projektinitiierung mit dem Ziel, das Potential der Druckverfahren zur Herstellung von großflächigen durchgehenden oder strukturierten Schichten auf die Herstellung der beiden Schichtarten der Aktoren zu übertragen. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die drucktechnische

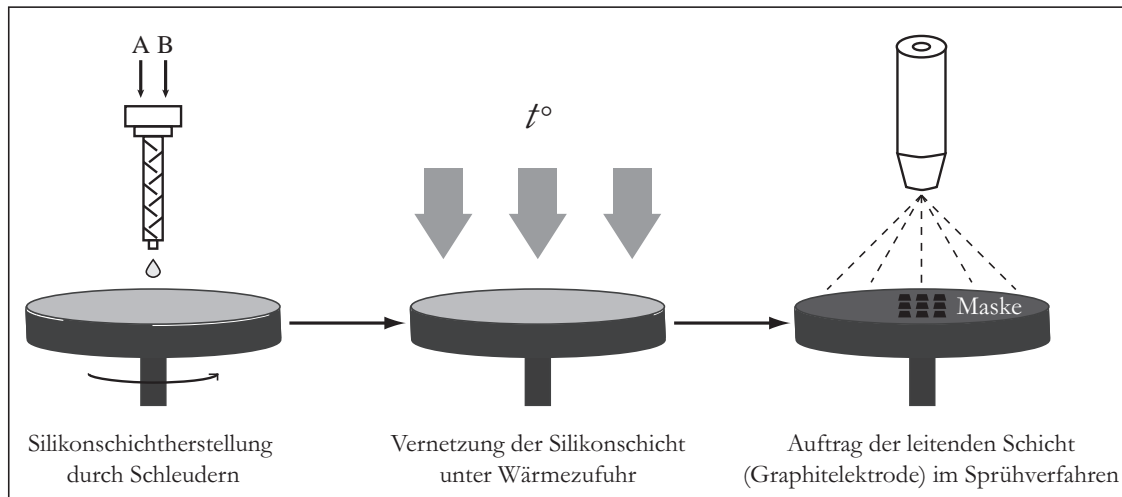


Abbildung 1.3.: Herstellungsverfahren für dielektrische Stapelaktoren entwickelt am EMK (nach JUNGMAHN und LOTZ [59, 77]).

Herstellung der Silikonschichten dar, die durch bestimmte physikalische und chemische Eigenschaften der Silikone entstand.

Die drucktechnische Herstellung der oben beschriebenen Schichten kann dem Bereich *funktionaler Druck* zugeordnet werden. Als funktionaler Druck wird gewöhnlich der Druck von elektronischen Bauteilen und Schichten bezeichnet. Der Hauptunterschied zum graphischen Druck ist das Ergebnis des Druckprozesses. Im grafischen Druck wird eine Bild- oder Textwiedergabe mit bestmöglichem optischem Eindruck erzielt. Beim funktionalen Druck sind hingegen Schichten gewünscht, die eine technische Funktion erfüllen. Je nach Anwendung sollen diese Schichten beispielsweise als Elektroden, Dielektrika, Halbleiter oder Ähnliches dienen, die wiederum als Bestandteile solcher Anwendungen wie Transistoren, OLED-Beleuchtungen, RFIDs, Aktoren, Solarzellen, Batterien dienen [43, 69, 160]. Bei der Qualitätsbeurteilung wird hier nicht mehr der optische Eindruck, sondern die Funktionsfähigkeit und die Performance<sup>1</sup> der Schicht zum Kriterium.

Im grafischen Druck werden Bilder und Texte anhand von Rasterpunkten wiedergegeben. Bei einer Vergrößerung wird sichtbar, dass das graphisch gedruckte Motiv aus mehreren Punkten oder Strichen zusammengesetzt ist (Abb. 1.4 a)). Im Falle des funktionalen Drucks sind oft durchgehende oder streng definierte scharfkantige Schichten erwünscht. Die Ebenheit der Schicht und ggf. die Anwesenheit von diversen Einschlüssen in der Schicht beeinflussen die Funktionsfähigkeit der Schichten oder der Bauteile. Abbildungen 1.4 b) - d) stellen Makroaufnahmen von im funktionalen Druck hergestellten Schichten dar.

Die für die Herstellung elektronischer Bauteile benötigten Materialien sind meistens Fluide mit komplexem rheologischen Verhalten. Mit der rheologischen Charakterisierung solcher Fluide und deren Eignung für die Druckprozesse beschäftigte sich STAHL [134]. Die erwünschten Bauteile haben meistens einen mehrschichtigen Aufbau. Demnach werden die Fluide übereinander gedruckt. Dabei können die Materialien in Wechselwirkungen treten, sich gegenseitig chemisch angreifen oder ineinander diffundieren. Mit der Detektion der dabei entstehenden Mischschicht setzte sich TONE auseinander

<sup>1</sup> engl. Leistung, Betriebsverhalten

## 1. Einleitung und Zielsetzung

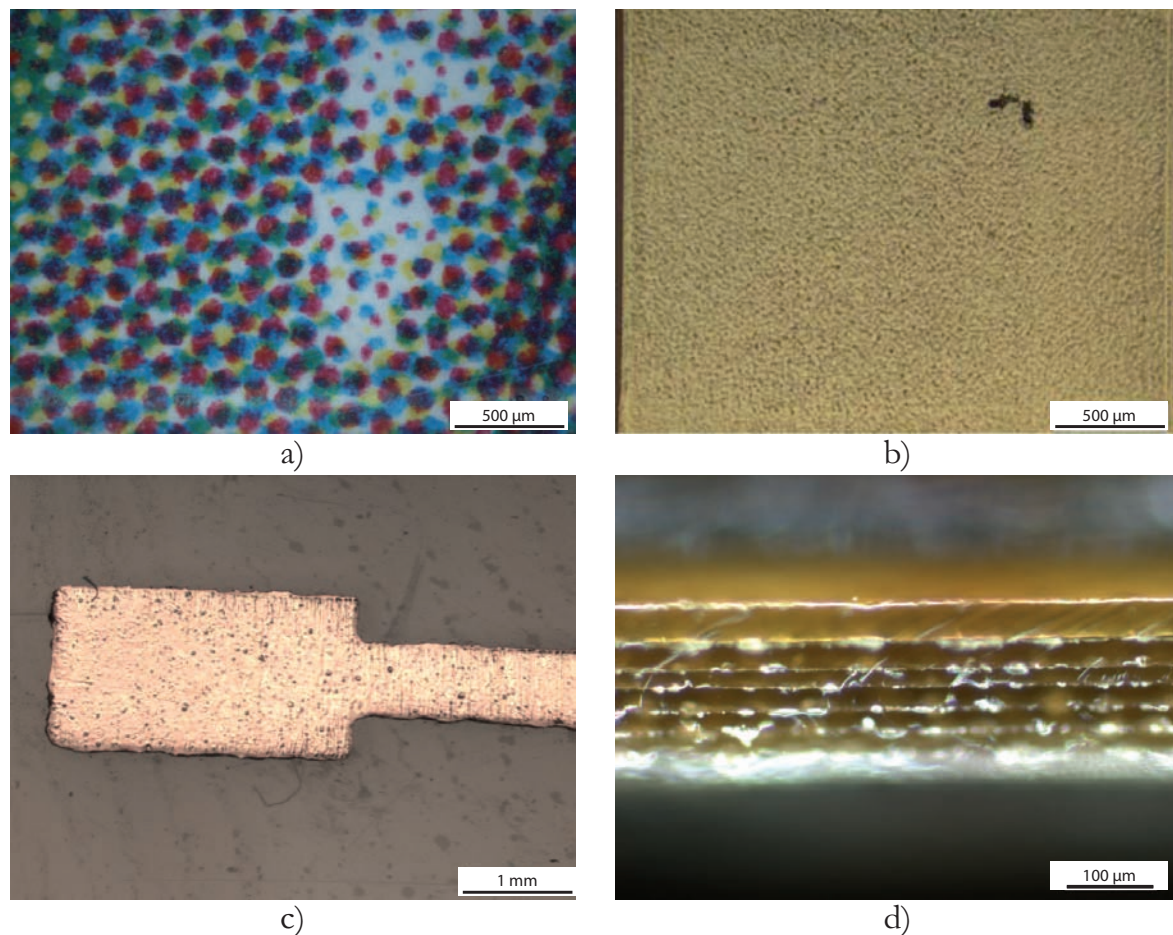


Abbildung 1.4.: Makroaufnahmen von Erzeugnissen des grafischen a) und funktionalen b)-d) Drucks. a) Ein im Offset gedruckter Bogen. b) Eine im Flexodruck hergestellte Silberschicht auf einer PMMA-Schicht [108]. c) Eine geprägte Aluminiumfolie auf PET-Substrat. d) Kanten eines mittels Siebdruck und Filmziehen hergestellten dielektrischen Elastomeraktors (Seitenansicht).

und entwickelte eine dafür geeignete Methode auf Basis der Impedanzspektroskopie [147].

Die größte Verbreitung im funktionalen Druck finden Tief-, Flexo- und Siebdruck (Abb. 1.5). Auch andere Verfahren wie Prägefoliendruck haben ein hohes Potential für die Anwendung im Elektronikbereich, wie von LYASHENKO gezeigt [78]. Tief- und Flexodruck zeichnen sich durch die Möglichkeit aus, niederviskose (ca. 0,01 - 0,5 Pa·s) Fluide zu verarbeiten. Im Tiefdruck (Abb. 1.5a)) können sehr dünne Schichtdicken (im Nanometerbereich) erzeugt werden, was das Verfahren attraktiv für die Herstellung von OLEDs<sup>2</sup>, OPV<sup>3</sup> und OTFTs<sup>4</sup> macht [52, 34]. Auf diesem Themengebiet forschten BORNEMANN und STAHL. Dabei beschäftigte sich BORNEMANN mit der Simulation des Tiefdruckvorgangs [13, 12], STAHL untersuchte die Prozessparameter und deren Einfluss auf die Schichtqualität [133, 135].

Das Kernelement des Flexodrucks ist eine flexible Druckform (Abb. 1.5b)), die aus elas-

---

<sup>2</sup>organic light emitting diode

<sup>3</sup>organic photovoltaic

<sup>4</sup>organic thin film transistor

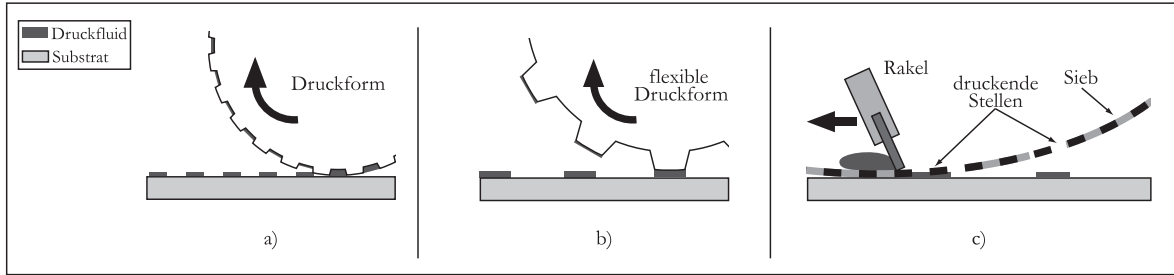


Abbildung 1.5.: Schematische Darstellung von a) Tief-, b) Flexo- und c) Siebdruck. Im Tiefdruck wird das Druckfluid aus den Vertiefungen an der Druckform auf das Substrat übergeben. Beim Flexodruck übertragen die erhabenen Elemente einer flexiblen Druckform das Druckfluid auf das Substrat. Im Siebdruck wird das Druckfluid anhand einer Rakel durch die offenen (druckenden) Stellen im Sieb durchdrückt.

tischen Fotopolymeren oder Gummi besteht. Ein typisches Merkmal des Flexodrucks sind Quetschränder, auch Halo-Effekt genannt, die im grafischen Druck als ein Defekt gesehen werden. RANFELD widmete ihre Forschung diesem Phänomen, um es für den Druck der Source-Drain-Strukturen für Dünnschichttransistoren auszunutzen [110]. GRIESHEIMER erforschte die Farbspaltungsphänomene von Druckfarben im Flexodruck [39]. Erfolgreich konnte Flexodruck zur Herstellung von Elektrolumineszenz-Panels von RANFELD und THEOPOLD und von OTFTs von SPIEHL und GANZ umgesetzt werden [111, 131, 34]. SAUER untersuchte die Saffmann-Taylor-Instabilität beim Flexodruck - auch als viscous fingering bekannt - ein Effekt, der die Schichtqualität negativ beeinflussen kann [114]. Mittels umfangreicher Testreihen untersuchte THEOPOLD das Quellverhalten von Flexodruckformen, die von Lösemitteln in den Druckfluiden chemisch angegriffen werden [143, 144, 145, 142].

Im Gegensatz zu Flexo- und Tiefdruck, werden im Siebdruck hochviskose Fluide (Pasten, bis 50 Pa·s) verdrückt (Abb. 1.5c)). Es werden größere Schichtdicken erreicht (mehrere Mikrometer bis über hundert Mikrometer). SAUER und RANFELD entwickelten eine alternative Methode zur Herstellung von Elektrolumineszenz-Panels mithilfe des Siebdrucks [115, 107]. Zusätzlich konnte RANFELD mit Erfolg eine thermochrome Uhr im Siebdruck herstellen [106].

Das Inkjet-Verfahren, welches der Verbraucher oft aus der gewöhnlichen Büroausrüstung in Form eines Inkjet-Druckers kennt, arbeitet ohne eine Druckform und gilt daher als sehr flexibel für diverse Einsätze. Dies macht Inkjet sehr attraktiv für funktionale Anwendungen wie OLEDs und OFETs<sup>5</sup>. Der Simulation dieses Druckverfahrens widmete sich SALUN [113].

Ein hohes Potential für die Herstellung elektronischer Bauteile hat die Kombination aus den konventionellen Herstellungsverfahren und Druckverfahren. So können die notwendigen Herstellungsbedingungen wie beispielsweise eine bestimmte Gasatmosphäre, die z.B. zur Verhinderung von Metalloxydierung in der Luft dient, eingehalten werden [146]. Die Integration der Druckprozesse in die Prozesse der Mikroelektronik können maßgeblich die Herstellung diverser Leiterbahnen optimieren [109, 108].

Die Motivation dieser Arbeit wird mit Abbildung 1.6 illustriert, auf der ein Foto einer

<sup>5</sup>organic field effect transistor

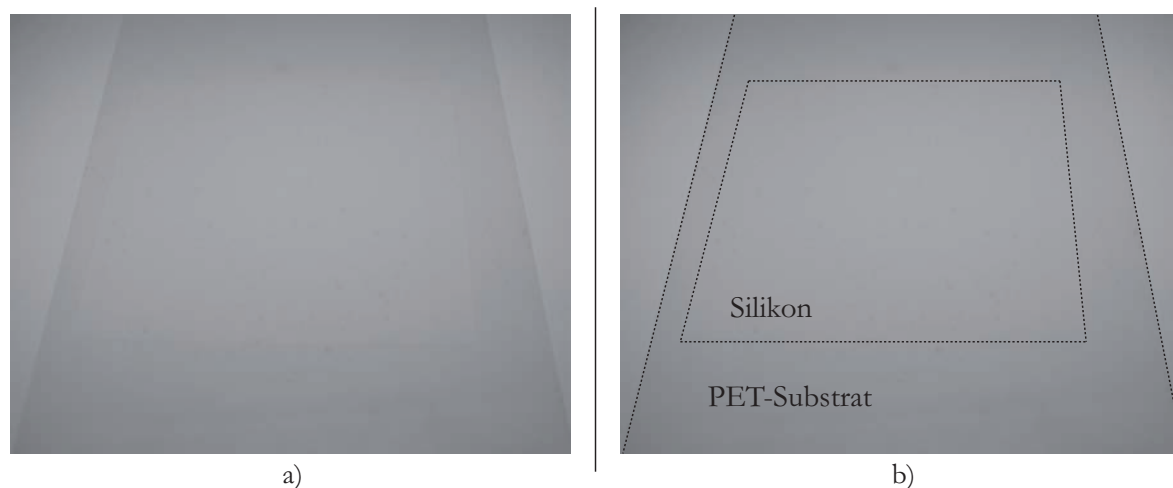


Abbildung 1.6.: Foto einer im Siebdruck hergestellten Silikonschicht auf einem PET-Substrat.  
a) ohne Bildkorrektur. b) Bildkorrektur zur Veranschaulichung: Gestrichelte Linien grenzen das Silikon und das PET ein.

Silikonschicht (Siebdruck) auf einem PET-Substrat zu sehen ist, die als Dielektrikum für einen dielektrischen Stapelaktor dienen soll. Ohne die eingrenzende gestrichelte Linie ist die Silikonschicht optisch kaum vom Substrat zu unterscheiden. Auch durch die zur Verfügung stehenden optischen Charakterisierungs- und Messverfahren konnten die Schichtgrenzen oder -topografie nicht oder nur bedingt bestimmt werden.

Vor der gleichen Hürde standen ca. ein Jahr früher auch STAHL und BORNEMANN, die sich ebenfalls mit dem Verdrucken von transparenten funktionalen Fluiden auf ebenfalls transparenten Substraten im Tiefdruck beschäftigten. Nach längerer Suche wurden mehrere Verfahren aus unterschiedlichen Gründen aussortiert. Dies diente STAHL und BORNEMANN als Motivation für die Entwicklung neuer optischer Methoden. Diese basierten auf den physikalischen Phänomenen der Interferenz oder der Absorption und eignen sich zur optischen Vermessung und Charakterisierung sehr dünner (Dicken im Nanometerbereich) transparenter Schichten [12, 133]. Beide von BORNEMANN und STAHL entwickelten Methoden werden in Kapitel 3 ausführlich dargestellt. Trotz vieler Vorteile konnten diese nicht universell zur Charakterisierung beliebiger transparenter Schichten inklusive Silikonschichten eingesetzt werden, da entweder Modifikationen der Fluide oder eine spezielle Kombination der Materialien und den zu verwendenden Substrate nötig gewesen wären. Um die Silikonschichten ohne jegliche Veränderungen charakterisieren zu können, wurde von der Autorin eine alternative Methode auf Basis der Schattenabbildung entwickelt. Diese wird in der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

## 1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit setzt sich aus zwei Schwerpunkten zusammen. Zum einen wird untersucht, ob und mit welchen Druck- und/oder Beschichtungsverfahren die Herstellung von großflächigen (ca. DIN A5) Schichten aus Silikonen für den Einsatz in dielektrischen Stapelaktoren realisierbar ist. Der Einfluss der Verfahren, der variierbaren Prozessparameter und der Materialien (Silikone) auf die Qualität der Schichten wird ebenfalls untersucht. Bei der Wahl der Materialien und der Her-



stellungsmethoden dielektrischer Schichten für taktile Anwendungen müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Die Aufgabe besteht dabei darin, eine Schnittmenge der drei Bereiche taktile Anwendungen, Silikone und Herstellungsverfahren zu finden (Abb. 1.7). Jeder der drei Bereiche besitzt seine Anforderungen, die die Auswahl an Verfahren und Materialien eingrenzen.



Abbildung 1.7.: Schnittmenge der drei Bereiche, die ausschlaggebend für die Wahl der Materialien und der Herstellungsverfahren sind.

Um die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Schichtqualität zu ermöglichen, soll eine Charakterisierungsmethode entwickelt werden, die einen direkten Vergleich der unterschiedlich hergestellten Silikonschichten erlaubt. Diese wird zum zweiten Schwerpunkt dieser Arbeit.

Kapitel 2.1 beschäftigt sich mit den Grundlagen der dielektrischen Stapelaktoren. In Kapitel 2.2 werden die Grundlagen der Silikone hinsichtlich taktiler Anwendungen und deren späterer Einsatz in Druck- und Beschichtungsverfahren dargestellt. Anschließend wird eine Auswahl an Silikonen vorgestellt, die für die Zwecke der Arbeit auf theoretischer Basis als geeignet befunden wurden. Die Vielfalt der Druck- und Beschichtungsverfahren wird in Kapitel 2.3 behandelt. Es wird dabei ebenfalls eine Auswahl an theoretisch zur Herstellung von Silikonschichten geeigneten Verfahren getroffen.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der optischen Charakterisierung transparenter Silikonschichten. Dabei werden in Kapitel 3.1 die Schichthomogenität und Schichtinhomogenitäten als Qualitätskriterien eingeführt. Kapitel 3.2 behandelt die existierenden Charakterisierungsmethoden für transparente Schichten und die bei ihrem Einsatz in der Charakterisierung der Silikonschichten entstehenden Probleme. Die theoretischen Hintergründe und Grundlagen der in dieser Arbeit entwickelten Methode sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

Zur Überprüfung der hinter der entwickelten Charakterisierungsmethode stehenden Theorie wird eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Ihr Aufbau, die Durchführung und ihre Ergebnisse schildert Kapitel 4.

Kapitel 5.1 beschäftigt sich mit der Herstellung der Silikonschichten in allen Kombinationen der ausgewählten Verfahren und Materialien. In Kapitel 5.2 wird der Aufbau des optischen Prüfstands sowie die Durchführung der optischen Versuche auf den Proben beschrieben, die in Kapitel 5.1 hergestellt wurden.

Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 6 vorgestellt und diskutiert. Als erstes wird die optische Charakterisierungsmethode validiert und ihre Grenzen werden untersucht (Kap. 6.1). Die Ergebnisse und die Diskussion der Druck- und Beschichtungsversuche,

## *1. Einleitung und Zielsetzung*

der Vergleich der Proben und das Fazit der Arbeit sind in Kapitel 6.2 dargestellt.

Kapitel 7 gibt eine Zusammenfassung der Arbeit sowie einen kurzen Ausblick auf mögliche nachfolgende Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet.



## 2. Dielektrische Stapelaktoren: Grundlagen und Auswahl der Materialien und Verfahren zur Herstellung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit druck- oder beschichtungstechnischer Herstellung und optischer Charakterisierung dünner transparenter Silikonschichten, die den Anforderungen der taktilen Anwendungen entsprechen. Im folgenden Kapitel werden die relevanten Grundlagen erläutert. Als erstes werden die taktilen Anwendungen im Unterkapitel 2.1 vorgestellt. Im Unterkapitel 2.2 wird die Vielfalt der Silikone dargestellt und eine Auswahl unter Berücksichtigung der Einschränkungen getroffen, die durch die taktilen Anwendungen zustande kommen. Wegen der spezifischen physikalischen Eigenschaften der Silikone kommen nicht alle Druck- und Beschichtungsverfahren zu deren Verarbeitung in Frage. Eine Übersicht der konventionellen Druck- und Beschichtungsverfahren wird im Unterkapitel 2.3 erläutert. Anschließend wird genauer auf die Verfahren eingegangen, die die Verarbeitung der Silikone ermöglichen.

### 2.1. Aktoren für transparente taktile Anwendungen

Seit spätestens 2007, dem Jahr, in dem das erste iPhone von der Firma Apple vorgestellt wurde, herrscht ein neuer Trend in der Telekommunikationswelt. Dieser Trend kann kurz mit einem Wort bezeichnet werden – *Touch*. Das englische Wort bedeutet *tasten* oder *berühren*. Geräte mit Touch-Technologie verzichten, oft sogar fast komplett, auf die herkömmlichen mechanisch-elektrischen Tasten als Eingabehilfe. Die Steuerung erfolgt mittels eines Touchscreens, also eines glatten Bildschirms, der auf Berührungen reagiert. Der Touchscreen bleibt dabei eben, sodass die Felder, die die Rolle der Tasten übernehmen, taktil nicht spürbar sind und vom Benutzer ausschließlich visuell wahrgenommen werden können.

In den letzten Jahren beherrschen diverse Smartphones and Tablets den Markt, sodass sogar die Notwendigkeit gewöhnlicher Rechner in Frage gestellt wird [162]. Mit der Touchtechnologie wurden neue Arbeitsinterfaces entwickelt, die die Bedienung der Geräte erleichtern sollen. Diese sind meistens kachelähnlich aufgebaut. Dabei wurden manche Anwendungen vernachlässigt. Dazu zählen zum Beispiel schnelles Tippen von Texten oder die präzise Arbeit mit dem Mauszeiger [90]. Diese gestalten sich viel leichter, wenn der Benutzer ein taktil spürbares Relief (erhabene Tasten beispielsweise) zur Verfügung hat.

An dieser Stelle werden die Bedürfnisse der Nutzer mit eingeschränktem Sehvermögen

## 2. Dielektrische Stapelaktoren

nicht erfüllt, da die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ohne visuelle Kontrolle nicht möglich ist. Nach Angaben der Europäischen Union der Blinden (European Blind Union) sind es geschätzt mehr als 30 Millionen Menschen im geografischen Europa, die unter Blindheit oder Sehbehinderungen leiden, 90% davon sind älter als 65 Jahre [30]. Vor allem für diese Verbrauchergruppe wären neue Entwicklungen in Richtung taktile Ein- und/oder Ausgabegeräte sehr wichtig und vorteilhaft, bei denen eine Bedienung durch den Tastsinn erfolgen kann.

Tastsinn gehört zu den fünf Sinnen des Menschen neben Gesichts-, Hör-, Geruchs- und Geschmackssinn. Er dient vor allem zur Wahrnehmung von Oberflächeneigenschaften. Dabei geschieht die Wahrnehmung mit Hilfe von sehr vielen Rezeptoren. Die meisten davon befinden sich in der Haut, einige sind ebenso in den Muskeln und Gelenken zu finden [62].

Ein E-Reader oder ein Mobiltelefon mit Brailleschrift, das taktil spürbare Tasten bzw. Bereiche hat und über die Flexibilität der Touchgeräte verfügt, wäre für eine Bedienung über den Tastsinn geeignet. Je nach Anwendung könnten so verschiedene Bereiche unterschiedlich angesteuert und programmiert werden und sich dadurch in ihrer Oberfläche unterscheiden. Für diese Zwecke bieten sich *Aktoren* an. Ein Beispiel dafür liefert MATYSEK mit einem vibrotaktilen Bedienfeld für einen mp3-Player [82]. Sie werden im Folgenden näher beschrieben.

### 2.1.1. Dielektrische Elastomeraktoren

Es existiert eine Vielfalt an Funktionsprinzipien von Aktoren. Sie basieren auf unterschiedlichen physikalischen Phänomenen. Dabei wird meistens elektrische oder magnetische Energie in mechanische umgewandelt. Eine der Aktorenklassen ist die der „elektrostatischen“ Aktoren. Zu ihnen gehören die dielektrischen Polymeraktoren, die die Vorteile der sich ständig entwickelnden neuartigen Polymere ausnutzen. Dielektrische Polymere gehören zu *elektroaktiven Polymeren* (EAP). Diese werden durch die Änderung ihrer Form oder Gestalt unter Einfluss von äußeren Impulsen gekennzeichnet [8, 14]. Weiter werden EAP in ionische und elektronische klassifiziert. Eine Übersicht über die elektroaktiven Polymere liefert Abbildung 2.1. Die Abbildung gliedert die physikalischen Phänomene, die der Wirkung der Polymere zu Grunde liegen. EAP-Anwendungen zeigen sich sehr erfolgreich. Manche davon werden in Robotertechnik verwendet. Dazu gehören die *dielektrischen Elastomeraktoren* (DEA).

Dielektrische Elastomeraktoren können in einer Vielzahl von Einsatzgebieten Verwendung finden. Es wird an unterschiedlichsten Anwendungen geforscht, für die eine große Zukunft erwartet wird. Ein Beispiel dafür sind taktile Displays, deren einfachste Variante ein Braille-Display ist. Taktile Displays dienen zur Wiedergabe von Blindenschrift in Form kleiner Punkte. JUNGMAHN und MATYSEK entwickelten einen in einen Datenhandschuh eingebauten planaren gestapelten Aktor, der ein Braille-Display nachahmte [59, 83]. LOTZ entwickelte eine Anwendung dielektrischer Elastomeraktoren als peristaltische Pumpe zur Fluidförderung [76, 77]. BAR-COHN verspricht den dielektrischen Elastomeraktoren eine große Zukunft als künstliche Muskeln (*engl.* artificial muscles) [9]. SMELA empfiehlt DEA für biomedizinische Anwendungen wie Blutgefäßverbindungen [129]. OPTOTUNE AG stellte ein Autofokus-System von Handykameras, das aus EAPs besteht, mit Hilfe der Aktorik wird dabei eine stufenlose Ver-

stellung der Brennweite erreicht, genau wie durch die Muskel in einem Auge [149]. ARTIFICIAL MUSCLE, INC., eine Tochterfirma von BAYER MATERIALSCIENCE LLC, entwickelte eine auf Aktoren mit EAP basierende Technologie *Vivitouch HD Feel*, die in mobile Geräte mit Touch-Technologie, wie Smartphones, integriert werden kann. Dabei werden durch die Aktorik diverse taktile Signale erzeugt, die die Benutzung von den Geräten erheblich erleichtert und erweitert [152].

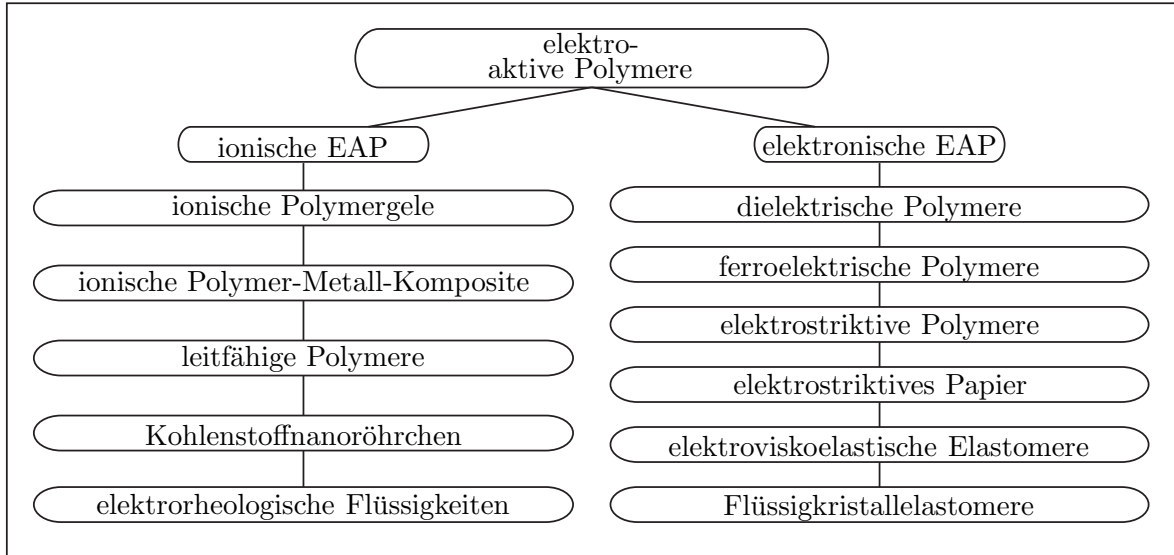


Abbildung 2.1.: Übersicht über die Variationen elektroaktiver Polymere (EAP) nach [76].

Das Funktionsprinzip und unterschiedliche Ausführungen der DEA werden im Folgenden betrachtet.

### 2.1.2. Arbeitsprinzip und Bauweisen dielektrischer Stapelaktoren

Der einfachste dielektrische Aktor arbeitet kapazitiv und besteht aus drei Schichten (Abb. 2.2). Sein Aufbau ähnelt dem eines Plattenkondensators mit dem Unterschied, dass sich zwischen den Elektroden eine elastische Dielektrikumschicht befindet.

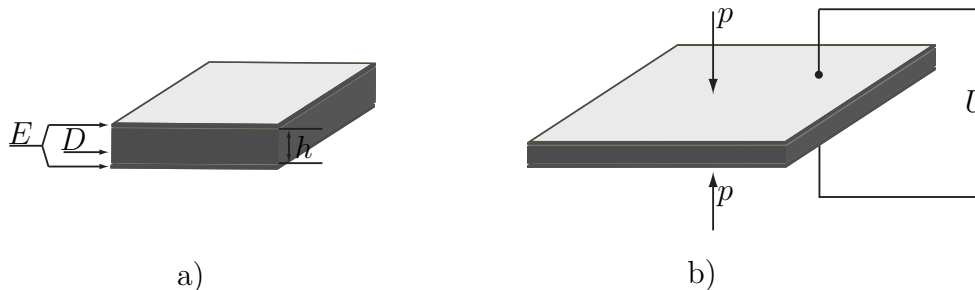


Abbildung 2.2.: Arbeitsprinzip eines dielektrischen Elastomeraktors nach [43]. a) Die Dielektrikumschicht  $D$  der Dicke  $h$  ist von zwei Elektrodenschichten  $E$  umgeben. b) Unter Spannung  $U$  ziehen sich die Elektroden gegenseitig an und üben einen mechanischen Druck  $p$  auf die elastische dielektrische Schicht aus.

Die Elektrodenschichten sind ebenso elastisch und nachgiebig. Die isolierende Schicht

## 2. Dielektrische Stapelaktoren

wird aus einem hoch elastischen dielektrischen Polymer *Elastomer*<sup>1</sup> hergestellt. Wird an die Elektroden eine elektrische Spannung  $U$  ([V]) angelegt, so werden die Elektroden gegensätzlich geladen und ziehen sich gegenseitig an. Dies übt einen mechanischen Druck auf das Dielektrikum dazwischen aus, es wird gestaucht. Unter der Annahme von Inkompressibilität verursacht die Stauchung in eine Richtung eine Verdrängung des Materials in der dazu senkrechten Ebene. Durch das Anlegen der Spannung und die dadurch entstehende Quetschung wird also die Aktordicke geringer und die Aktorfläche größer. Je nach Aktoraufbau wird dies unterschiedlich genutzt.

Der auf das Dielektrikum wirkende mechanische Druck wird MAXWELL-Druck genannt und in [Pa] gemessen. Dabei ist das Verhältnis zwischen der elektrischen Spannung zum Quadrat  $U^2$  und dem mechanischen Druck  $p$  durch die relative Permittivität des Dielektrikums  $\varepsilon$  definiert (Formel 2.1 [100]):

$$p = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{U^2}{h^2} \quad (2.1)$$

Der MAXWELL-Druck kann praktisch in jedem elastischen Material auftreten [76]. Der MAXWELL-Druck ist umgekehrt proportional der Schichtdicke  $h^2$  (Formel 2.1 [100]).  $\varepsilon_0$  ist die Permittivität im Vakuum. Demzufolge muss die Dicke des Dielektrikums minimiert werden, um einen hohen mechanischen Druck bei niedrigen Spannungen zu erreichen.

Dielektrische Elastomeraktoren erreichen sehr hohe Dehnungen im Bereich 10 – 30%. Um die benötigten elektrischen Spannungen niedrig zu halten ist es sinnvoll, dass die Schichtdicken für das Dielektrikum zwischen 10 und 100  $\mu\text{m}$  liegen (je nach Durchschlagfeldstärke) [62]. Die absoluten Auslenkungen, die auf diese Weise erreicht werden können, sind zu gering für die meisten Aktoranwendungen, da sie unter der Wahrnehmungsschwelle liegen. Dazu gibt es mehrere Baukonzepte, wie diese erhöht werden können. Deren grundsätzliches Merkmal ist die Kombination von mehreren Schichten in unterschiedlichen Weisen. Im Weiteren werden einige Beispiele erläutert.

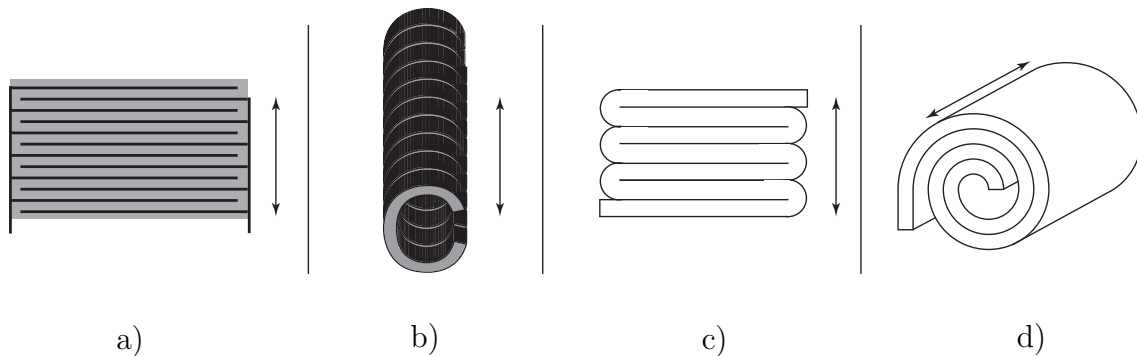


Abbildung 2.3.: Beispiele unterschiedlicher Typen beim Aufbau von Aktoren. Der Pfeil zeigt jeweils die Richtung der Größenänderung. a) Gestapelter Aktor nach [105]. b) Helixförmiger Aktor nach [17]. c) Gefalteter Aktor nach [18]. d) Gerollter Aktor nach [62]

In der Abbildung 2.3 a) ist ein gestapelter Aktor dargestellt. Diese Variante existiert wie in waagrecht (wie gezeigt), als auch in senkrechter Anordnung der Schichten. Ein helix- oder ein schraubenförmiger Aktor besteht aus zwei helixförmig geschnittenen

<sup>1</sup>Die Materialienvielfalt wird in Kapitel 2.1.3 genauer betrachtet.

Teilen einer Elastomerröhre, auf deren Schnittkanten vorzeitig das Elektrodenmaterial aufgebracht wird (Abb. 2.3 b)). Ein länglicher kontinuierlich gefertigter Aktor, der gefaltet wurde, zeigt Abbildung 2.3 c)). Ein länglich kontinuierlich gefertigter Aktor kann ebenfalls gerollt werden (Abb. 2.3 d)). Bei helixförmigen und gerollten Aktoren wird die Größenänderung (Dehnung) in die Längsrichtung erzielt.

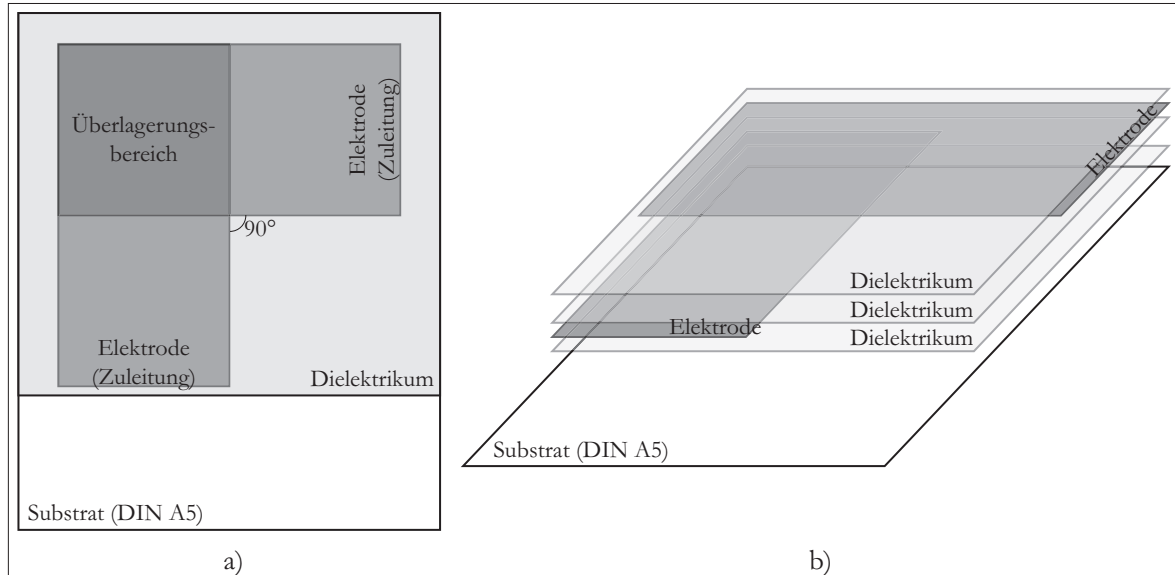


Abbildung 2.4.: Möglicher Aktoraufbau für druck- und beschichtungstechnische Versuche (a) Draufsicht, b) Explosionsansicht) nach [43]. Der Aktor besteht aus drei dielektrischen (Dielektrikum) und zwei leitenden Schichten (Elektroden), die abwechselnd auf ein Substrat (ca. DIN A5) aufgebracht werden. Die sich nicht überlappenden Bereiche der Elektroden können als Zuleitungen für elektrische Spannung genutzt werden. Im Überlagerungsbereich beider Elektroden kann die Funktion des Aktors überprüft werden.

Ein denkbarer und vereinfachter Aktoraufbau für druck- und beschichtungstechnische Versuche im Rahmen dieser Arbeit, der geeignet ist, die Funktionstüchtigkeit der Aktoren zu überprüfen, ist in Abbildung 2.4 vorgestellt. Auf ein Substrat (ca. DIN A5) wird zunächst eine dielektrische Schicht aufgebracht. Darauf wird die erste leitende Schicht (Elektrode) aufgetragen, abgeschlossen von einer zweiten dielektrischen Schicht. Auf letztere wird eine weitere leitende Schicht aufgetragen, gedreht um 90°. Der Aufbau wird mit der letzten dielektrischen Schicht abgeschlossen. Die freien Flächen der Elektroden können als Zuleitungen für die elektrische Spannung dienen (z.B. indem sie mit leitenden Drähten durchgestochen werden). Im Bereich, wo sich beide Elektroden räumlich überlagern, kann die Funktionsfähigkeit des Aktors wie folgt überprüft werden: Bei einem funktionstüchtigen Aktor entsteht in diesem Bereich der MAXWELL-Druck, der zu Stauchung der dazwischen liegenden dielektrischen Schicht führt.

### 2.1.3. Materialienvielfalt bei der Herstellung dielektrischer Aktoren

Wie im Unterkapitel 2.1.2 beschrieben, sind zwei Schichtarten der Hauptbestandteil eines DEA: Elastisches Dielektrikum und Elektrode, welche auf das Dielektrikum aufgebracht wird. Die Materialwahl hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Performance des DEA.

### Elektrode

Zur Herstellung der Elektrode werden leitfähige Materialien benötigt. Dabei stellt die notwendige Dehnbarkeit eine besondere Anforderung an das Material. Diese Eigenschaft wird bei keinem anderen Aktortyp benötigt, da es nur im DEA-Fall zu einer Vervielfachung der Aktorfläche durch das Anliegen der Spannung von mehreren 100% kommt [76]. LOTZ unterteilt die leitfähigen Materialien, die zum Einsatz bei der DEA-Herstellung kommen, in fünf Kategorien [76]:

1. Ionenimplantationen,
2. Metalle,
3. Polymere,
4. Graphite und Ruße und
5. Kohlenstoffnanoröhrchen.

Im ersten Fall entsteht die Elektrodenschicht durch einen Beschuss einer Dielektrikumschicht mit Metallionen. Die besten Ergebnisse werden beim Beschuss mit Ionen edler Metalle wie Gold oder Palladium erreicht. Die leitfähige Schicht erreicht dabei eine Dicke von ca. 50 nm und kann durch Schattenmaskierung, also Platzierung einer feinen Metallschablone vor die Dielektrikumschicht, strukturiert werden [76].

Metallelektroden (oft aus Silber) weisen eine sehr hohe Leitfähigkeit auf. Diese werden beispielsweise gedruckt [43] oder gesputtert [65].

Leitfähige Polymere wie Polythiophen (PEDOT), Polyanilin (PANI) und Polypyrrol (PPy) stellen eine weitere Materialienklasse dar. Die Leitfähigkeit von Polymeren ist nicht so hoch wie bei Metallen. Polymere liegen oft als wasserbasierte Fluide vor. Deren Auftrag auf das meist hydrophobe Dielektrikum ist dadurch sehr schwierig. Eine Oberflächenvorbehandlung der Dielektrikumschicht zur Verbesserung der Benetzbarkeit (mittels Corona- oder Plasmaanlagen) ist dafür notwendig.

Graphit und Ruß bestehen aus Kohlenstoffpartikeln. Dabei ist Graphit die natürliche Form vom Kohlenstoff. Die Atome bilden hexagonale Strukturen, die im Kristall schichtweise angeordnet sind. Ruß wird hingegen industriell hergestellt und besteht aus kugelförmigen Aggregaten. Eine Herstellungsmethode für DEA mit Einsatz von Graphit in Form einer Sprühlösung entwickelte JUNGMAN in seiner Dissertation [59].

Kohlenstoffnanoröhrchen (*engl.* carbon nano tubes) sind eine weitere Form des Kohlenstoffs, die erst in den 1990er Jahren synthetisiert wurden. Diese weisen eine sehr hohe Leitfähigkeit schon bei sehr dünnen Schichten auf. Allerdings ist deren Auftrag mit für Nanopartikel typischen Komplikationen verbunden: Durch eine sehr große spezifische Oberfläche<sup>2</sup>, neigen die Partikel stark zur Agglomeration, was die Überführung in eine Lösungsform sehr erschwert [76].

### Dielektrikum

Neben dem Elektrodenmaterial spielt das Material der isolierenden Schicht eine extrem wichtige Rolle für die Performance eines dielektrischen Elastomeraktors. Auch hier

---

<sup>2</sup>Bei einem porösen bzw. pulverförmigen Stoff gemessene und auf eine Massen- oder Volumeneinheit bezogene Oberfläche [118]

finden mehrere Materialienklassen Anwendung [76]:

1. Polyacryl,
2. Polyurethan (PU),
3. Thermoplastische Elastomergele und
4. Silikon.

Polyacryl ist in der Aktorherstellung hauptsächlich als doppelseitiges Klebeband VHB<sup>®</sup> von der Firma 3M zu finden. Seine hohe Klebkraft erleichtert den nachfolgenden Elektrodenauftrag. Allerdings beträgt die Schichtdicke des Klebebandes 0,5 – 1 mm [1], was eine Vordehnung des Klebebandes notwendig macht. Da dieses Produkt als Klebeband vertrieben und spezifiziert wird, sind die elektrischen Eigenschaften sekundär und schwanken erheblich [76]. Ein weiterer gravierender Nachteil dieses Materials ist sein viskoelastisches Verhalten.

Polyurethane sind in Form von dünnen Schichten erhältlich und sind als Dielektrika sehr gut geeignet. Erfahrungsgemäß ist ihre Prozessierung bei der Herstellung von DEA ziemlich schwierig. Zudem besitzen sie einen sehr hohen Elastizitätsmodul (im Megapascalbereich), was deren Einsatz im Vergleich zu anderen Isolationsmaterialien ungünstig macht.

Thermoplastische Elastomergele sind durch Polystyrol und Polystyrene vertreten. Diese sind im Vergleich zu Polyacryl, Polyurethan und Silikon Blockpolymere, die aus einem elastischen Kern und glasartigen Ketten an den Moleküleenden bestehen. Dieser molekulare Aufbau verursacht eine physikalische Vernetzung der Polymerketten bei Wärmezufuhr. Durch ihre physikalische Natur ist diese Verbindung reversibel, die Vernetzung kann daher mehrfach hintereinander stattfinden. Nach LOTZ haben die thermoplastischen Elastomergele ein großes Potential bei der Herstellung von DEA. Der Einsatz der thermoplastischen Elastomergele befindet sich noch in der Entwicklungsphase [76].

Hinter Silikonen verbirgt sich eine sehr große Polymerklasse. Silikone sind auf dem Markt sehr verbreitet und finden Einsatz in einer Vielfalt der Anwendungen. Diese Polymere bestehen aus -Si-O-Ketten. Silikone zeichnen sich durch sehr gute isolierende Eigenschaften und elastisches Verhalten aus. Ein großer Vorteil von Silikonen ist ihre kommerzielle Erhältlichkeit in vielen Varianten. Produkte mehrerer Hersteller wie Dow Corning, Wacker und BJB Enterprises Inc. wurden erfolgreich für Aktorenherstellung getestet [76, 100, 16, 130]. Silikone scheinen ein hohes Potential für die Zukunft der Aktorik zu haben. Vor der Verarbeitung befinden sich Silikone in der Flüssigphase, was diverse Auftrags- und Fertigungsmöglichkeiten bietet. Der Härtungsprozess ist in vielen Fällen leicht durch Wärmezufuhr oder Kühlung zu kontrollieren. Aufgrund der aufgezählten Eigenschaften etablierten sich die Silikone für die Aktorherstellung und werden ebenso in vorliegender Arbeit als Material für die Herstellung dielektrischer Schichten von DEAs herangezogen. Silikoneneigenschaften und ihre Verarbeitungsspekte werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

## 2.2. Silikone als Material für dielektrische Stapelaktoren

Wie bereits erwähnt, etablierten sich die Silikone für die Herstellung dielektrischer Stapelaktoren. Einer der Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit ist der Auftrag dünner Silikonschichten zur Herstellung von DEAs. Für die Auswahl passender Druck- und Beschichtungsverfahren sind Kenntnisse auf dem Bereich der Silikone nötig. Ein Überblick über die Silikone ist im Folgenden dargestellt.

### 2.2.1. Übersicht über Silikone

*Polymere*, auch *Makromoleküle* genannt, bestehen aus sich mehrmals wiederholenden Einheiten (*Monomeren*) [74]. Zu den Polymeren zählen unter anderem die *Silikone*. Deren Moleküle bestehen aus -Si-O- -Bausteinen [33]. Die Strukturformel linearer Polymere ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

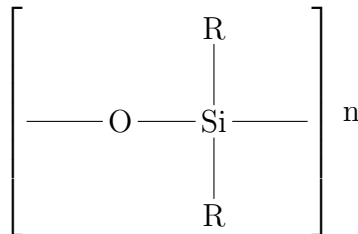


Abbildung 2.5.: Strukturformel von Silikonen (R - Organogruppe)  $((\text{R}_2\text{SiO})_n)$  [92, 33] .

Silikone finden Anwendung in zahlreichen Branchen. In der Hochspannungstechnik werden sie zur Herstellung von Verbund- und Schirmisolatoren für aufwendige Isolationssysteme verwendet [70, 96]. In der Medizin- und Zahntechnik werden sie für diverse prothetische Ziele herangezogen [81, 161]. Im Alltag ist der Mensch von Erzeugnissen aus Silikon umgeben. Beispiele dazu sind unterschiedliche Dichtungen und Küchenzubehör wie Backformen und Pfannenwender [156]. PAPAILIOU gibt eine Übersicht von Herstellungsverfahren für Silikonverbundisolatoren an, die die üblichen Herstellungsverfahren für diverse Silikonerzeugnisse spiegelt [96]:

- Gießen,
- Streichen,
- Niederdruckformbefüllen,
- Spritzguss,
- Extrusion und
- (Transfer-)Pressen.

Das am einfachsten auch unter Laborbedingungen realisierbare Verfahren ist das Gießen. Dabei wird das Silikon in eine Gussform gefüllt, anschließend wird es aus der Gussform abgezogen. Die aufgezählten Verfahren erzeugen Silikonschichten im Millimeterbereich. Aus diesem Grund sind diese Verfahren nicht für die Aktorenerstellung geeignet, da sonst eine extrem hohe elektrische Spannung notwendig wäre, um eine ausreichende Auslenkung zu erreichen.



Es existieren mehrere Silikonklassen: Flüssige Silikone (Silikonöle, Silikonfette), Silikonharze und Silikonkautschuke [5]. Silikonöle finden ihre Anwendung in der Heizungs-, Kühl- und Hydrauliktechnik. Sie werden ebenso als Schmiermittel genutzt [161]. Als *Silikonkautschuke* oder *-elastomere* werden Silikone bezeichnet, die durch Vernetzung aus zähflüssigem, plastischem Zustand in elastische Vulkanisate *Silikongummi* überführt werden [92]. Sie stellen eine der wichtigsten Klassen dar.

Silikonelastomere sind durch stark verbundene Ketten gekennzeichnet. Sie werden vor allem in der Medizintechnik und in der Nahrungsmittelindustrie aufgrund ihrer speziellen physikalischen und chemischen Eigenschaften verwendet. Silikonelastomere haben eine sehr hohe Temperaturstabilität von  $-70\text{ °C}$  bis  $+250\text{ °C}$  und einen hohen Scherkraftwiderstand. Sie zerfallen nur geringfügig über die Zeit und sind resistent gegen Oxidation und Hydrolyse. Sie sind biokompatibel und chemisch inert [161]. All diese Eigenschaften machen Silikonelastomere unentbehrlich in der Medizintechnik, wo sie als Implantatmaterialien, Sonden, Katheter, Umhüllungen von Wundverbänden und Herzschrittmachern eingesetzt werden [161] und gelten ebenfalls als Voraussetzung für die Verwendung bei Elastomeraktoren.

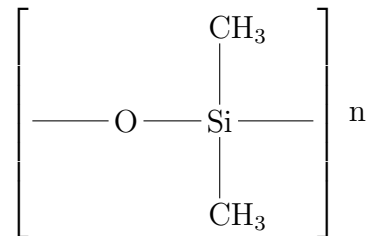


Abbildung 2.6.: Strukturformel von PDMS [161].

Die am meisten verbreiteten Silikonelastomere sind Polydimethylsiloxane (PDMS) [76]. Die Strukturformel von PDMS ist der Abbildung 2.6 zu entnehmen. In diesem Fall sind zwei Methylgruppen mit jedem Kohlenstoffatom verbunden.

Bei den Silikonelastomeren werden weitere Klassen unterschieden in Abhängigkeit von der Überführungsreaktion aus dem unvernetzten in den vernetzten Zustand. Das Hauptmerkmal ist dabei die Temperatur, bei der die Vernetzung oder die Vulkanisierung stattfindet. Im Falle der hochtemperaturvernetzenden (HTV) Silikonelastomere erfolgt diese unter Wärmezufuhr.

Die raumtemperaturvernetzenden (RTV) Silikonelastomere gehören zu den kaltvulkanisierenden und vernetzen, wie aus dem Namen ersichtlich, bereits bei Raumtemperaturen. RTV-Silikonelastomere werden nach Komponentenanzahl in einkomponentige (RTV1) und zweikomponentige (RTV2) differenziert. RTV1-Silikonelastomere benötigen die Luftfeuchtigkeit aus der Umgebung für die Vulkanisierung. Die Reaktionsgeschwindigkeit kann durch Variation des Luftfeuchtigkeitsanteils manipuliert werden [5]. RTV2-Silikonelastomere können auf zwei Wegen vulkanisieren. Bei den kondensationsvernetzenden RTV2-Silikonelastomeren erfolgt die Polymerisation durch Polykondensation. Das charakteristische Merkmal der Polykondensation ist, dass das Makromolekül durch die Abspaltung vom Wasser oder einfachen Verbindungen (z.B. Alkohol oder Essigsäure) entsteht (Abb. 2.7). In diesem Fall wird der Hauptkomponente eine Härterkomponente beigemischt, die Vernetzer und Katalysator enthält. Die Reaktionsgeschwindigkeit kann hier durch die Menge der Härterkomponente gesteuert werden [5].

## 2. Dielektrische Stapelaktoren

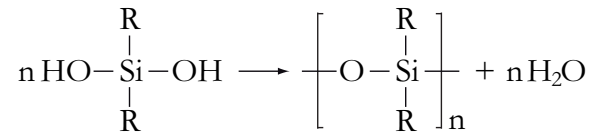


Abbildung 2.7.: Chemische Gleichung der Reaktion Polykondensation (R - Organogruppe) [33].

Eine weitere RTV2-Klasse nennt sich additionsvulkanisierend. Die Polymerisation erfolgt hier als Polyaddition. Dieses Polymerisationsverfahren funktioniert ähnlich wie die Polykondensation. Jedoch werden dabei keine niedermolekularen Verbindungen abgespalten, sondern einzelne Atome, meistens Wasserstoff, wandern von einer Monomerart zu der anderen (Abb. 2.8). Dadurch werden Valenzen frei, die zur Verbindung der beiden Monomerarten führen [91]. Bei diesen RTV2-Silikonelastomeren werden die zwei Komponenten mit Vernetzern und Katalysatoren getrennt gelagert. Die chemische Reaktion setzt bei der Raumtemperatur ein, nachdem die Komponenten zusammengeführt und miteinander vermischt werden. Der Prozess kann aber durch steigende Temperatur beschleunigt und durch absinkende Temperatur verzögert werden [154].

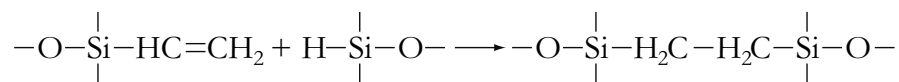


Abbildung 2.8.: Chemische Gleichung der Reaktion Polyaddition [33].

### 2.2.2. Vermischung und Dosierung zweikomponentiger Silikonsysteme

Die Vermischung zweier Komponenten eines RTV-Silikonelastomers leitet die chemische Reaktion der Vulkanisierung ein. Dabei muss die Vermischung sehr sorgfältig durchgeführt werden, da dieser Schritt einen enormen Einfluss auf die Qualität der zukünftigen Schicht hat. Es ist darauf zu achten, dass das Mischungsverhältnis streng eingehalten wird. Eine homogene Verteilung beider Komponenten ist sicherzustellen [45]. Hierfür werden oft *statische Mischer* eingesetzt. Bei den statischen Mixern erfolgt die Vermischung aus der Strömungsenergie der sich vereinigenden Komponenten im Inneren eines Mischrohrs [45]. Eine schematische Darstellung eines statischen Mixers ist in Abbildung 2.9 zu sehen. Der Kern eines statischen Mixers ist ein Rohr, in dem sich mehrere jeweils um 90° versetzte Mischwendel befinden [45]. Die sich zu vermischenden Komponenten A und B treffen sich an der Eingangsöffnung des Mischrohrs und sind davor räumlich von einander getrennt. Da statische Mischer sehr preiswert sind und ein einfaches Arbeitsprinzip besitzen, sind sie weit verbreitet.

Die Zeitspanne zwischen der Vermischung beider Komponenten und der Verdoppelung der Viskosität aufgrund der chemischen Reaktion der Polymerisation nennt sich *Topfzeit* [56]. Die Topfzeit bestimmt somit die Zeit, in der das Silikon verarbeitungsfähig ist. Bei den RTV-Silikonelastomeren ist die im Datenblatt angegebene Topfzeit oft sehr kurz (typisch 20 – 40 Minuten). Allerdings sind in manchen Fällen die ersten

## 2.2. Silikone als Material für dielektrische Stapelaktoren

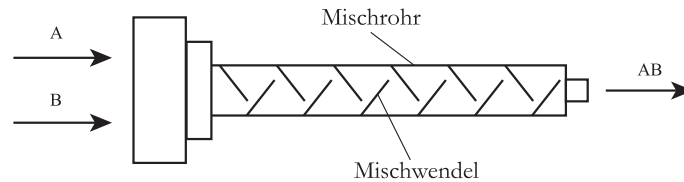


Abbildung 2.9.: Schematische Darstellung eines statischen Mixers. Die zunächst räumlich von einander getrennten Komponenten A und B werden vermischt, indem sie das mit Mischwendeln gefüllte Mischrohr passieren.

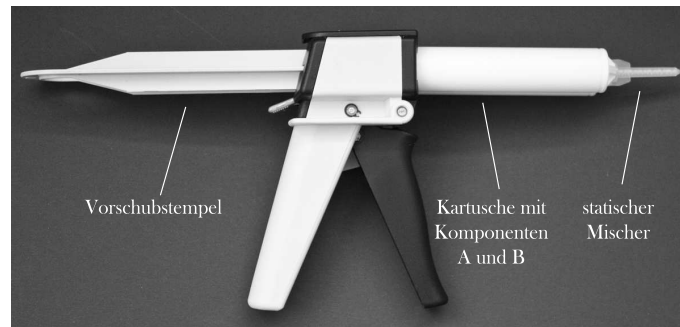


Abbildung 2.10.: Handpistole zur Vermischung zweikomponentiger Silikone. Die zu vermischenden Komponenten A und B werden zuerst in den getrennten Kammern der Kartusche gelagert. Der Vorschubstempel übt einen mechanischen Druck auf den Inhalt der Kartusche und drängt ihn in das statische Mischrohr, wo die Vermischung der Komponenten erfolgt.

Anzeichen der einsetzenden Vernetzung viel schneller da (bereits nach wenigen Minuten), was evtl. dadurch zu erklären ist, dass die vereinigten Komponenten bereits im Mischrohr anfangen zu vernetzen. Sollte es der Fall sein, wird das nachkommende Silikon nicht mehr richtig vernetzt. Es ist also ratsam, das Mischrohr vor jedem neuen Dosiervorgang von den Resten des vorherigen zu befreien und die Mischrohre regelmäßig zu wechseln. Aus demselben Grund werden im Falle von RTV-Systemen die Vermischung und Dosierung zeitnah durchgeführt. Dies zeigt sich an der Konstruktionsart der meisten Dosiersysteme. Dosiersysteme werden manuell und automatisch betrieben. Die manuelle Dosierung ist auch im Alltag bekannt und nimmt meistens die Form einer Handpistole an (Abb. 2.10). Dabei werden die Silikonkomponenten in eine Kartusche gefüllt, auf die ein statisches Rohr aufschraubt wird. Beide Teile werden in der Pistole platziert. Die Dosierung erfolgt durch den mechanischen Druck, der vom Vorschubstempel auf den Inhalt der Kartusche ausgeübt wird.

Die manuelle Lösung ist günstig und leicht zu handhaben. Sie eignet sich sehr gut für Vorversuche und kleinere Machbarkeitsstudien. Allerdings ist sie nicht ausreichend genau bzw. reproduzierbar für wissenschaftliche oder industrielle Zwecke. In diesen Bereichen finden die automatisierten Dosiersysteme ihren Einsatz. Ein Beispiel eines solchen Systems, wie es am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren und am Institut für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt in der Anwendung ist, ist in der Abbildung 2.11 zu sehen. Hier werden die Silikonkomponenten in zwei Kunststoffspritzen gefüllt. Die Stempel der Spritzen werden von zwei Schrittmotoren geschoben. Die Komponenten werden zu einem gewöhnlichen statischen Mischrohr durch die angeschlossenen Schläuche geführt. Dieses System bietet mehr Flexibilität bei den Einstellungen. So sind mehrere Parameter variierbar:

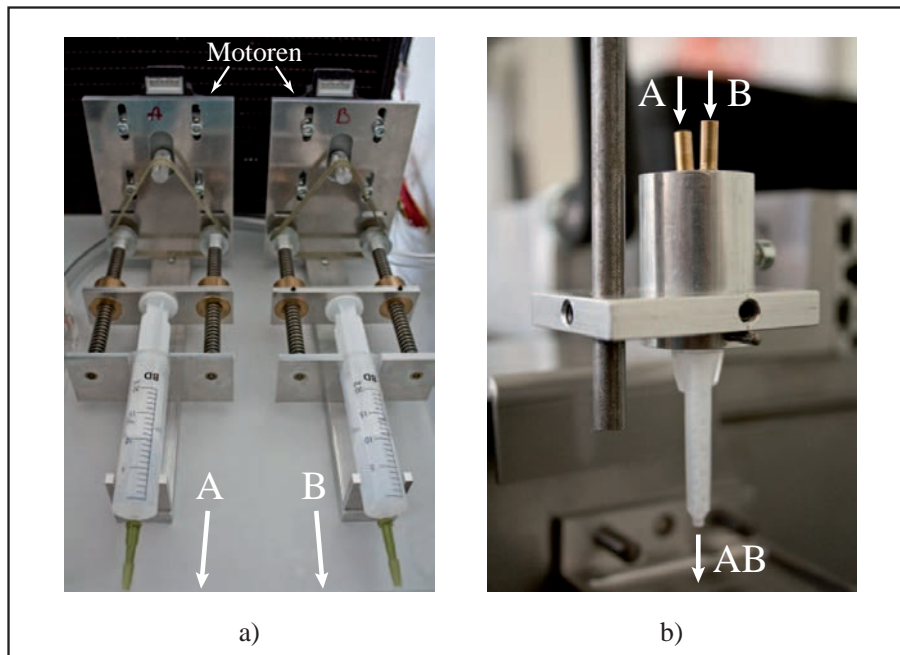


Abbildung 2.11.: Automatisierte Dosiereinheit. a) Zwei Schrittmotoren fördern beide Silikonkomponenten A und B, die sich getrennt in Spritzen befinden. Durch Schläuche (nicht abgebildet) werden die Komponenten zu einer Mischspitze gefördert. b) An der Mischspitze wird ein gewöhnliches Mischrohr platziert. Die Komponenten treffen sich am Eingang des Mischrohrs und werden im Mischrohr vermischt.

Mischungsverhältnis, Dosiermenge, Dosiergeschwindigkeit.

Für isolierende funktionale Schichten ist die Vermeidung von Luft einschließen von hoher Bedeutung. In der Schicht gefangene Luftbläschen können zu funktionalen Störungen in der Schicht - wie beispielsweise Kurzschluss - führen. Deswegen ist eine Entgasung noch vor der Vermischung bzw. Dosierung zu gewährleisten. Diese kann in einem Exsikkator stattfinden, in den die Kartusche oder die Dosierspritzen mit beiden Silikonkomponenten platziert werden und der anschließend für eine bestimmte Zeit evakuiert wird.

### 2.2.3. Prozess- und produkttechnische Anforderungen an die Silikone

Damit ein Silikon für die Herstellung von DEA als geeignet bezeichnet werden kann, muss es über gewisse Eigenschaften verfügen. Diese umfassen bestimmte

- mechanische,
- elektrische,
- prozessbedingte und
- endproduktbedingte Spezifikationen.

Mechanische Eigenschaften bestimmen den späteren Betrieb des Aktors. Bei der Materialauswahl ist dabei zu berücksichtigen, dass das Dielektrikum elastisch (E-Modul

30 – 200 kPa) und möglichst inkompressibel (Querkontraktionszahl  $\nu \approx 0.5$ ) ist. Ein Ausschlusskriterium bei der Silikonwahl ist die Reißdehnung. Diese gibt Längenveränderung in % bis das Material unter mechanischer Belastung reißt. Im Falle der dielektrischen Elastomeraktoren handelt es sich um mehrere 100%. Eine weitere wichtige mechanische Eigenschaft ist die Härte des Silikons. Um die an den Aktor anzulegende Spannung zu minimieren, die den mechanischen MAXWELL-Druck beeinflusst, ist es sinnvoll weiche Silikone zu benutzen (Härte Shore A  $\leq 40$ ).

Die elektrischen Eigenschaften dienen zum sicheren Betrieb des Aktors. Die Silikonschicht ist eine Isolationsschicht. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen: Hohe Durchbruchfeldstärke und hohe relative Permittivität ( $\epsilon \geq 3$ ). Um die elektrischen Verluste zu minimieren, sollte das Silikon einen hohen spezifischen Widerstand haben [59].

Prozessbedingte Einschränkungen entstehen erst, wenn der Prozess definiert wird. In vorliegender Arbeit besteht das Ziel, die Silikonschichten druck- oder beschichtungs-technisch aufzutragen. Diesen Techniken und deren Details, wie verarbeitbare Fluidviskositäten, widmet sich das Kapitel 2.3.1. Grundsätzlich gilt dennoch: Eine niedrigere dynamische Viskosität  $\eta < 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  würde die Verarbeitung in mehreren Druck- und Beschichtungsverfahren erlauben. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Topfzeit. Eine zu kurze Topfzeit von nur wenigen Minuten kann die Verarbeitung immens erschweren, weil dadurch ein zusätzlicher Prozessschritt der Reinigung nach jedem Druckvorgang nötig wäre. Dies würde einen kontinuierlichen Prozess erschweren. Eine sehr lange Topfzeit (beispielsweise von mehreren Stunden) würde andererseits den Prozess unnötig verlängern angesichts der mehreren zehn bis mehreren hundert Silikonschichten, die für einen DEA nötig sind. Ideal wäre dementsprechend eine sehr lange Topfzeit, wobei die Vernetzung durch einen Außenimpuls (z.B. Wärmezufuhr) anstoßbar und danach extrem verkürzbar wäre.

Die Anwendung der Endprodukte im taktilen Bereich schließen jegliche Gefahrstoffe aus. Die Hautnähe erfordert, dass die Silikone nicht toxisch oder gesundheitsschädlich sind. Sie sollen chemisch, wärme-, feuchte- und schweißbeständig sein. Im Falle eines elektrischen Defekts darf das Silikon nicht brennen und es dürfen keine leitfähigen Substanzen dabei entstehen, die zu einem Kurzschluss führen können.

Die technischen Anforderungen an die Silikone sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1.: Anforderungen an die Silikone.<sup>3</sup>

Charakteristik	Zielwerte
E-Modul, kPa	30 – 200
Härte Shore A	$\leq 40$
Reißdehnung, %	$> 300$
Relative Permittivität $\epsilon$	$\geq 3$
dynamische Viskosität $\eta$ , Pa·s	$< 100$ , möglichst niedrig
Topfzeit	$\rightarrow \infty$ , gezielt verkürzbar

<sup>3</sup>Die Anforderungen an die Viskosität der Silikone werden durch den in dieser Arbeit gewünschten Einsatz von Druckverfahren zum Schichtenauftrag bedingt. Mehr dazu im Unterkapitel 2.3.1

### 2.2.4. Auswahl der Silikone

Bisher wurden Elastomeraktoren, die Silikone als Dielektrika nutzen, meistens mittels unterschiedlicher Gieß-, Schleuder- und Sprühverfahren hergestellt [17, 18, 76, 59]. Eines der Ziele der vorliegenden Arbeit ist es, die Dielektrikumschicht der DEAs drucktechnisch herzustellen. Bei der Wahl der Materialien und der Herstellungsmethoden dielektrischer Schichten für taktile Anwendungen müssen die sich daraus ergebenden Anforderungen berücksichtigt werden. Dabei lassen sich die Abhängigkeiten wie folgt darstellen:

$$\boxed{\text{Taktile Anwendungen} \rightarrow \text{Silikone} \rightleftharpoons \text{Herstellungsverfahren}}$$

Die übergeordnete Rolle bei der Materialienwahl spielt der Einsatz der Schichten in den taktilen Anwendungen. Dadurch sind die mechanischen, elektrischen und sicherheitstechnischen Eigenschaften vordefiniert und müssen eingehalten werden (s. Unterkapitel 2.2.3). Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wird die Auswahl der Silikone eingengt. Nun muss eine Schnittmenge für die für Aktoren geeigneten Silikone und den Herstellungsverfahren gefunden werden. Dies bedeutet eine Zuordnung der physikalischen Eigenschaften der Silikone den Anforderungen der Druck- und Beschichtungsverfahren (Unterkapitel 2.3). Dies war die Aufgabe für die Bachelor-Thesis von ARSLANTÜRK unter Betreuung der Autorin, in der die Vielfalt der für Aktorenherstellung geeigneten Silikone charakterisiert und nach Eignung für einen drucktechnischen Auftrag klassifiziert wurde [5]. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Bachelor-Thesis von ARSLANTÜRK wurden samt des bereits erwähnten WACKER Elastosil P7670 vier Silikone ausgesucht. Die vier Silikone werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht:

1. WACKER Elastosil P7670,
2. WACKER Elastosil PK 16,
3. WACKER Elastosil RT 625 und
4. NUSIL CF19-2186.

Dies sind RTV2-Silikonelastomere, deren dynamische Viskosität, Topfzeit und zum Teil das Mischungsverhältnis sich unterscheiden. Eine Übersicht der Eigenschaften der ausgewählten Silikone ist in Tabelle 2.2 zu finden. Ausführlichere Informationen zu den verwendeten Silikonem befinden sich im Anhang B.

Tabelle 2.2.: Übersicht technischer Daten ausgewählter Silikone (mehr Daten im Anhang B). Falls sich die Werte je nach Komponente (A, B) unterscheiden, werden diese entsprechend gekennzeichnet.

Eigenschaft	WACKER Elastosil P7670 A/B	WACKER Elastosil PK 16 A/B	WACKER Elastosil RT 625 A/B	NUSIL CF19- 2186
Mischungsverhältnis	1:1	1:1	9:1	1:1
Dyn. Viskosität, Pa·s	1,8	3,5 <sup>A</sup> ; 4,0 <sup>B</sup>	12	85 <sup>A</sup> ; 65 <sup>B</sup>
Topfzeit bei 23°C, min.	20	40	60	15

## 2.3. Druck- und beschichtungstechnische Herstellung dünner Silikonschichten

Für die Herstellung einzelner Schichten für dielektrische Stapelaktoren bieten sich Beschichtungs- und Druckverfahren an. Die Begriffe *Beschichtung* im Deutschen, sowie *Coating* im Englischen haben jedoch mehrere Bedeutungen. Zum einen, sind damit die Materialien (meistens Fluide), die auf ein Substrat aufgetragen werden, zum anderen, der Prozess des Auftragens gemeint. Allgemein ist es der Auftrag eines Materials - meistens in Flüssigphase - auf ein häufig biegsames Substrat, der in einem trockenen Film resultiert [158, 35]. Der eigentliche Sinn des Wortes Beschichtung ist dabei dem Kontext zu entnehmen. In vorliegender Arbeit wird unter Beschichtung der Auftragprozess verstanden.

Die allgemeine Prozessdefinition des Beschichtens kann je nach Anwendungsbereich konkretisiert werden. So wird darunter häufig der Auftrag von Kunststoffen aus einem Reservoir auf ein flexibles Substrat verstanden. Auch der Auftrag von dünnen Metallschichten oder Feststoffen aus der Gasphase kann als Beschichtungsverfahren bezeichnet werden, wobei sich dabei das physikalische Prinzip des Auftragens unterscheiden kann (Sputtern, Aufdampfen, Galvanisierung, Sprühverfahren) [6, 148, 76].

KIPPHAN definiert Drucken als „der Prozess der Übertragung von Farbe auf Papier (oder einen anderen Bedruckstoff) mittels einer Druckform“ [66]. Diese Definition stimmt nur im Bezug auf die konventionellen Verfahren des grafischen Drucks, die mit einer Druckform arbeiten. Eine erweiterte, ebenso zum funktionalen Druck besser passende Definition wäre *strukturierte Beschichtung*. Im Folgenden werden die Grundlagen der Druck- und Beschichtungsverfahren vorgestellt. Es werden relevante Herstellungsverfahren für die Silikonschichten ausgewählt. Zur Herstellung von Stapelaktoren werden die Schichten mehrfach übereinander gedruckt oder beschichtet (s. Unterkapitel 2.1.2). Zur Erklärung der Verfahren wird jeweils die Herstellung einziger Schicht (die erste dielektrische Schicht in Abbildung 2.4 auf S. 27) herangezogen. Im Anschluss werden die typischen Defekte der Schichten vorgestellt.

### 2.3.1. Übersicht und Auswahl der Druckverfahren

Beim Übergang vom grafischen zum funktionalen Druck besteht die Herausforderung in der Zusammenführung der Prozesse, die für das grafische Drucken geeignet sind, mit den funktionalen Materialien, die ursprünglich in anderen Herstellungsprozessen verarbeitet wurden. Hierbei werden oft sowohl Prozesse als auch die Materialien aneinander angepasst.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen die Silikonschichten für dielektrische Aktoren. Die Vielfalt der druckbaren Silikone und deren Eigenschaften wurden in Kapitel 2.2 dargestellt.

Heutzutage existieren mehrere Druckverfahren, die unterschiedlich klassifiziert werden können. Mögliche Klassifizierungen bieten DÖRSAM und KIPPHAN an [25, 66]. Die allgemein übliche Klassifizierung beginnt mit der Trennung der *konventionellen* Druckverfahren, die mit einer Druckform funktionieren, und der *digitalen* Druckverfahren, bei denen die Farb- bzw. Fluidübertragung ohne Druckform geschieht. Eine Übersicht

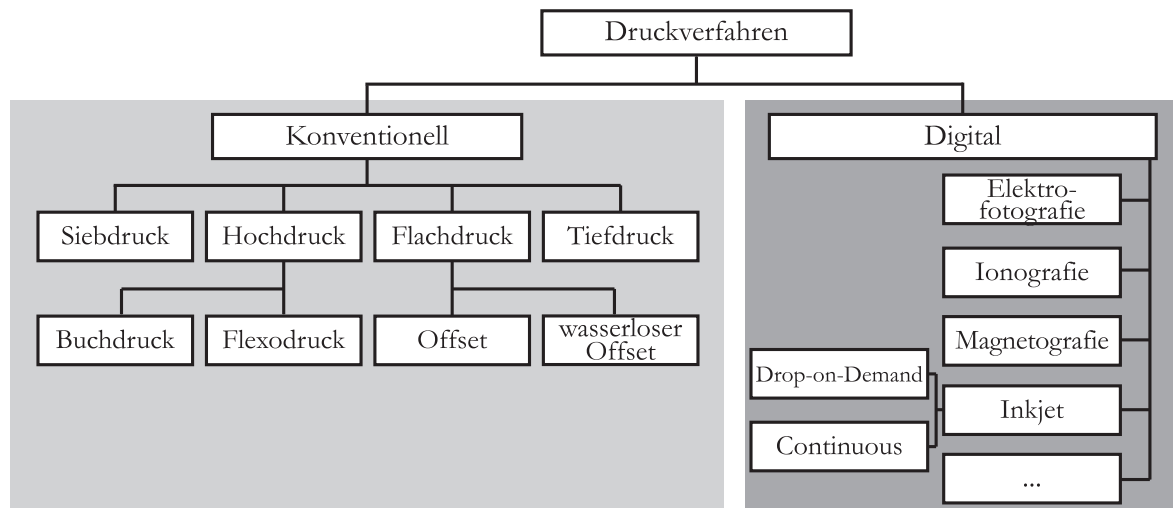


Abbildung 2.12.: Übersicht der Druckverfahren.

der Druckverfahren ist in Abbildung 2.12 gegeben.

Die digitalen Druckverfahren überzeugen durch ihre Flexibilität in der Druckmotivgestaltung, da keine Druckform benötigt wird und die Bebilderung bei jedem Druckvorgang neu geschehen kann. Wie es aus deren Bezeichnungen ersichtlich ist, liegen den digitalen Druckverfahren unterschiedliche physikalische Phänomene zugrunde, die die Auswahl der Druckmaterialien extrem eingrenzen können. So wird für die Magnetografie ein spezieller magnetischer Toner benötigt, Elektrofotografie und Ionografie funktionieren nur mit geladenem Flüssig- oder Pudertoner [66]. Dies macht den Einsatz dieser Druckverfahren für Silikonverarbeitung nahezu unmöglich.

Aufgrund seiner Flexibilität bezüglich der Bildgebung wegen der Arbeitsweise ohne eine Druckform ist das Drop-on-Demand-Inkjet-Verfahren für einen Silikonantrag interessant. Bei diesem Verfahren wird das Fluid aus einem Farbreservoir durch eine Düse dosiert und gelangt in Form kleiner Tropfen auf das Substrat. Die Dosierung kann z.B. anhand des piezoelektrischen Effekts erfolgen. Dieses Verfahren etablierte sich im grafischen Druck. An möglichen Anwendungen im funktionalen Druck wird ebenso aktiv geforscht [93, 112]. Die Anwendung von Inkjet zum Auftrag von Silikonschichten ist heute dennoch kaum denkbar. Im Inkjet können sehr niederviskose Fluide ( $0,001 - 0,03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) verarbeitet werden [127, 132], was die Verarbeitung der Silikone ohne Veränderung derer Formulierung (beispielsweise durch den Einsatz von Lösemitteln) unvorstellbar macht. Zusätzlich würde die fortschreitende Vernetzung des Silikons nach der Vermischung der Komponenten zu einer schnellen Verstopfung der Inkjet-Düsen führen.

Die konventionellen Druckverfahren werden nach der räumlichen Anordnung der druckenden und nicht druckenden Stellen auf der Druckform unterschieden. In Abbildung 2.13 sind die Druckformarten der konventionellen Druckverfahren schematisch dargestellt.

Bei Tief- und Hochdruck werden die druckenden und die nicht druckenden Stellen räumlich von einander getrennt. Die druckenden Stellen der Druckform beim Hochdruck sind erhaben und liegen beim Tiefdruck niedriger als die nicht druckenden Stellen der Druckform.



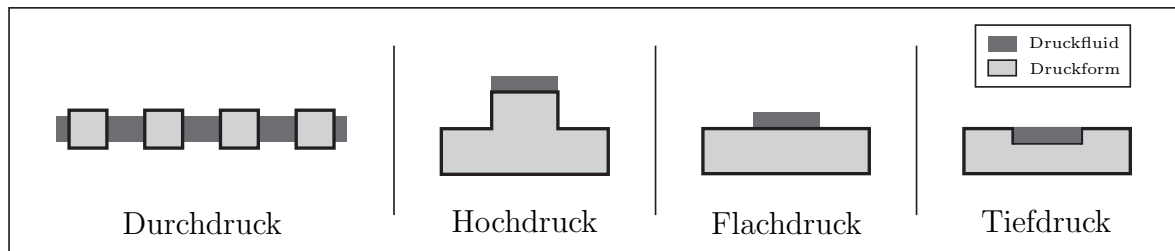


Abbildung 2.13.: Klassifizierung der konventionellen Druckverfahren nach der räumlichen Anordnung der druckenden und nicht druckenden Stellen.

Beim Flachdruck befinden sich die druckenden und die nicht druckenden Stellen nahezu auf einer Ebene und unterscheiden sich durch ihre physikalischen Eigenschaften. Die druckenden Stellen sind hydrophob und nehmen das hydrophobe Druckfluid auf. Die nicht druckenden Stellen sind hydrophil und werden vom Druckfluid nicht benetzt.

Beim Durchdruck, dessen verbreiteter Vertreter der Siebdruck darstellt, befindet sich die Druckfarbe in der Druckform. Die nicht druckenden Stellen sind von einer Schablone überdeckt und lassen im Gegensatz zu den druckenden Stellen das Druckfluid nicht durch.

Die Druckverfahren unterscheiden sich auch hinsichtlich weiterer Merkmale. Meist können mit einem Verfahren nur Fluide verarbeitet werden, deren Viskosität innerhalb eines engen Intervalls liegt. Eine zusammengefasste Übersicht der Fluidviskositäten und der erzielbaren Schichtdicken für die konventionellen Druckverfahren ist der Tabelle 2.3 zu entnehmen. Wie in Kapitel 2.2.4 erwähnt, zeichnen sich die Silikone durch hohe dynamische Viskositäten aus. Im Falle der in Kapitel 2.2.4 ausgewählten Silikone beträgt die minimale Viskosität 1,8 Pa·s bei Elastosil P7670 und die maximale 85 Pa·s bei Silopren LSR 2010. Dies schließt Inkjet (0,001 – 0,03 Pa·s), sowie Tief- (0,01 – 0,05 Pa·s) und Flexodruck (0,05 – 0,5 Pa·s) für den Silikonantrag aus.

Tabelle 2.3.: Erzielbare Schichtdicken und typische Fluidviskositäten mancher Druckverfahren nach STAHL [127, 132]

Druckverfahren	Schichtdicken, $\mu\text{m}$	Fluidviskositäten, Pa·s
Tiefdruck	0,05 - 5	0,01 - 0,05
Flexodruck	0,08 - 1,5	0,05 - 0,5
Offsetdruck	0,5 - 1,5	40 - 100
Siebdruck	1 - 100	0,5 - 100
Inkjet	0,05 - 5	0,001 - 0,03

Trotz der Viskositätsspanne von 40 bis 100 Pa·s ist der Einsatz vom Offsetdruck für den Auftrag von Silikonen schwer vorstellbar. Die druckenden und nicht druckenden Stellen einer Offsetdruckform befinden sich in nahezu derselben Ebene und unterscheiden sich in ihren Oberflächeneigenschaften. Die druckenden Stellen sind hydrophob, die nicht druckenden hydrophil. Vor dem Farbauftrag werden die nicht druckenden hydrophilen Stellen mit einer speziellen Lösung, Feuchtmittel genannt, befeuchtet, die Alkohol beinhaltet. Im unvernetzten Zustand sind die Silikone oft im Alkohol löslich. Die Wechselwirkungen zwischen Silikon und Feuchtmittel sind daher schwer abzuschätzen.

## 2. Dielektrische Stapelaktoren

Der nächste Punkt, der gegen den Offsetdruck für den Silikonantrag spricht, ist die Aufbereitung des Druckfluids im Farbwerk einer Offsetmaschine. Ein Einsatz von im Vergleich zu anderen Druckverfahren hochviskosen Fluiden wird dadurch ermöglicht, dass das Fluid im Farbwerk verteilt und verrieben wird. Dabei sinkt die Fluidviskosität aufgrund der Thixotropie<sup>4</sup>. Das Farbwerk bleibt während des Druckprozesses eingefärbt und wird mit Druckfluid nachgespeist, was im Falle von Silikon eine gleichzeitige Anwesenheit vom Silikon mit unterschiedlichem Vernetzungsgrad bedeuten würde. Wie im Kapitel 2.2 beschrieben, wird dadurch die Vernetzung gestört.

Die Literaturangaben zu der Viskositätsspanne für den Siebdruck setzten die maximale Grenze auf 50 Pa·s [127]. Allerdings ist es aus praktischer Erfahrung bekannt, dass das Verdrucken von Fluiden mit höherer Viskosität bis zu 100 Pa·s möglich. Der entscheidende Parameter ist dabei das Sieb, durch das das Fluid durchgedrückt wird und das an das Fluid angepasst werden kann.

Somit wird nur der Siebdruck als geeignet für den Silikonantrag befunden und wird im Folgenden näher erläutert.

### Siebdruck

Der Siebdruck gehört als einzig nennenswerter Vertreter des Durchdrucks neben dem Tief-, Hoch- und Flachdruck zu den Hauptdruckverfahren. Hier trennt eine Schablone auf einem Netzgewebe die druckenden Stellen von den nicht druckenden. Zusammen bilden die aufgebrachte Schablone und das Netzgewebe die Druckform (Abb. 2.14 a)). Das nicht mit der Schablone bedeckte Netzgewebe lässt beim Druckvorgang eine hochviskose Farbe (Paste) auf das Substrat durch.

Das Netzgewebe (auch *Sieb* genannt) wird meistens aus Polyester oder Polyamid gewoben, es kommen aber auch Siebgewebe aus Carbonfasern oder nichtrostendem Stahl zum Einsatz [119]. Bei der Materialwahl ist es essentiell, dass das Siebgewebe je nach Anwendung nicht vom Druckfluid oder vom Reinigungsmittel chemisch angegriffen wird. Neben dem Material stellt die Geometrie eine wichtige Charakteristik eines Siebes dar. Die Siebgeometrie ist durch die Fadenstärke  $w$  und den Fadenabstand  $d$  gegeben (Abb. 2.14 b)), sowie durch die Webart. Die Hersteller geben nebst dem Material immer zwei zusätzliche Parameter an: Die Fadenstärke in  $\mu\text{m}$  und die Fadenanzahl pro Längeneinheit (cm oder inch), die sich aus der Fadenstärke  $w$  und dem Fadenabstand  $d$  berechnen lässt. Diese Parameter sind unter anderem ausschlaggebend für die Dicke und die Beschaffenheit der gedruckten Schicht. Je nach Verhältnis  $w/d$  der Fadenstärke  $w$  und des Fadenabstands  $d$  werden die Siebe in drei Gruppen unterteilt [119]:

1.  $w > d$ ,
2.  $w \approx d$  und
3.  $w < d$ .

Siebgewebe aus der dritten Gruppe erzielen die feinsten Strukturen. Das Siebgewebe mit der Schablone wird fest in einen Rahmen gespannt, der beim Flachbettsiebdruck eine quadratische oder rechteckige Form hat.

---

<sup>4</sup>Thixotropie - Abnahme der Viskosität unter mechanischer Beanspruchung in Abhängigkeit von der Zeit [37].

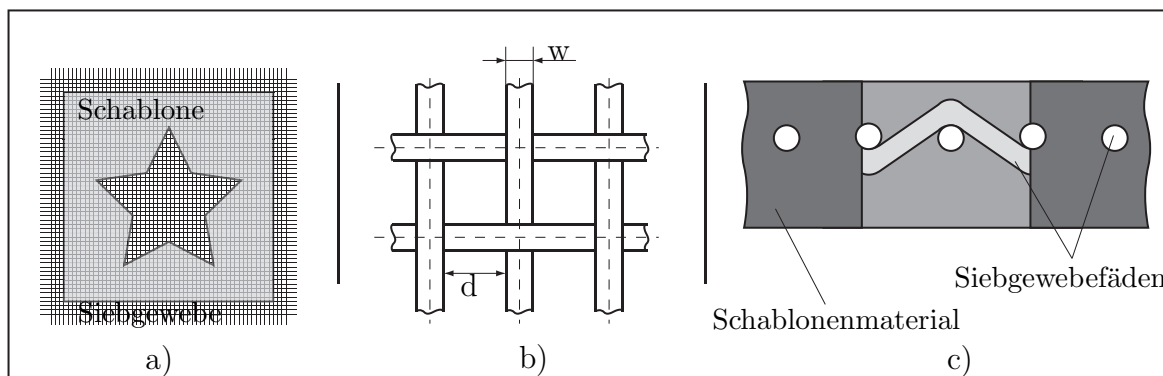


Abbildung 2.14.: Siebgewebe. a) Schematische Darstellung einer Schablone auf dem Siebgewebe. b) Siebgeometrie.  $w$ – Fadenstärke,  $d$ – Fadenabstand. c) Beispiel eines Siebgewebes im Schnitt (nach [66] und [119]).

Die Schablonenherstellung erfolgt heutzutage meistens fotomechanisch. Hierfür werden Fotopolymere auf Diazo-Basis<sup>5</sup> verwendet. Solche Polymere härten durch Zufuhr von Lichtenergie aus. Für die Schablonenherstellung gibt es drei Wege. Bei der Direktschablone wird das Polymer direkt auf das Sieb aufgebracht und belichtet. Die nicht gehärteten Polymere werden ausgewaschen und mechanisch entfernt und bilden somit die druckenden Stellen. Die bei der Belichtung gehärteten Polymere bleiben auf dem Sieb und ergeben die nicht druckenden Stellen. Bei der Indirektschablone wird das Polymer auf einem Träger belichtet und ausgewaschen und anschließend auf das Sieb übertragen. Bei "Direkt-Indirektschablone" wird das Polymer vorsichtig von einem Träger auf das Sieb übertragen, danach erfolgt die Belichtung und die mechanische Entfernung von den druckenden Stellen. Abbildung 2.14 c) stellt schematisch den Aufbau eines Siebgewebes mit der Schablone dar.

Abbildung 2.15 zeigt das Prinzip des Flachbettsiebdrucks. Dabei wird das Druckfluid durch das Sieb, das in einem Siebdruckrahmen fest eingespannt ist, auf ein Substrat mithilfe der Druckrakel durchgedrückt. Die Druckrakel wird entlang des Siebes in der Druckrichtung geführt. Die Qualität, die Dicke und die Oberflächenbeschaffenheit einer im Siebdruck hergestellten Schicht sind von mehreren Prozessparametern abhängig. Einen großen Einfluss darauf hat die Druckrakel, ihr Material, Härte und Geometrie. Von Bedeutung sind ebenso der Absprung, die Druckgeschwindigkeit, der Rakeldruck und der Winkel, den die Rakel zum Sieb bildet. Neben dem Flachbettsiebdruck existiert auch der Rotationsdruck, bei dem das Sieb zu einem Zylinder zusammengerollt und verschweißt wird [119]. An den Zylinderenden ist der Rahmen der Druckform befestigt.

Im grafischen Druck etablierte sich der Siebdruck vor allem bei der Produktion von kleinen Auflagen und mit für Druckverhältnisse hohen Schichtdicken ( $> 10 \mu\text{m}$ ) z.B. Visitenkarten, Plakate, Computertastaturen, Compact Disks und Textilien. Ebenso wird der Siebdruck im funktionalen Druck zum Drucken relativ dicker Schichten ( $5 - 100 \mu\text{m}$ ) eingesetzt, z.B. in der Fotovoltaik oder zum Druck von Leiterplatten und -bahnen, Sitzsensoren für PKWs, zur Herstellung von Elektrolumineszenz-Panels und dielektrischen Stapelaktoren [66, 107, 43]. In den letzten Jahren fanden diverse Untersuchungen zu neuen Siebbeschichtungen und angepassten Pastenzusammensetzungen statt, um die

<sup>5</sup>Diazoverbindungen sind organische lichtempfindliche Stoffe, allgemeine Strukturformel  $R_1R_2C=N=N$

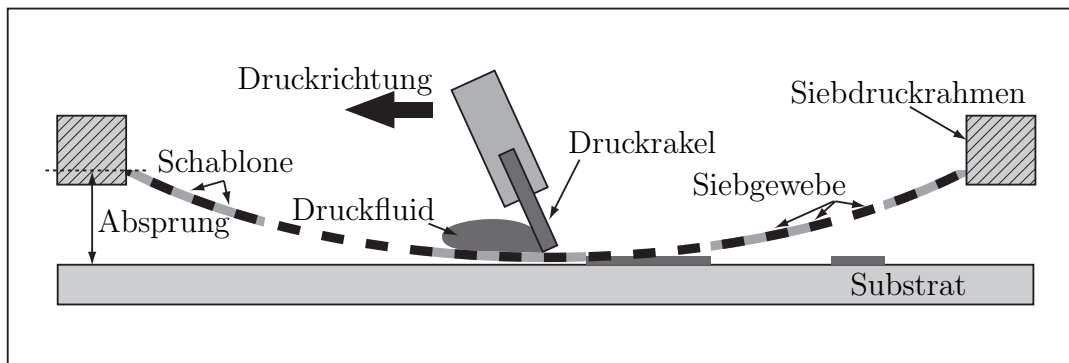


Abbildung 2.15.: Das Prinzip des Flachbettsiebdrucks. Die Druckrakel wird das Siebgewebe entlang bewegt, das in einem Druckrahmen befestigt ist. Das Druckfluid wird von der Rakel durch das Sieb auf das Substrat gedrückt. Mit Absprung wird der Abstand zwischen dem Sieb und dem Substrat bezeichnet.

Auflösung und die Qualität der mittels Siebdruck hergestellten funktionalen Schichten zu erhöhen [124].

### 2.3.2. Übersicht und Auswahl der Beschichtungsverfahren

Potentiell kann jedes Beschichtungsfluid mit ca. zwei Dutzend bedeutenden Beschichtungsverfahren auf ein Substrat aufgetragen werden<sup>6</sup> – dieser Satz von COHEN und GUTTOFF [20] vermittelt die Vielfalt der Beschichtungsverfahren, die auf unterschiedliche Weisen klassifiziert werden können. Mögliche Klassifizierungsmerkmale sind beispielhaft die Anzahl der Schichten (verschiedener Fluide) pro Vorgang, die Prozesskontinuität und die Fluidviskosität.

Die Wahl des optimalen Beschichtungsverfahrens ist nicht trivial. Dabei sind Kriterien wie die Schichtdicke, Anzahl der Schichten und das zu verarbeitende Fluid an sich (Zusammensetzung, Viskosität, andere Besonderheiten) ausschlaggebend.

Die Notwendigkeit der technologischen Verarbeitung von Silikonen, die meistens als hochviskose Flüssigkeiten vorliegen, bietet eine spezielle Klassifizierung nach der Art der Dosierung. Die Polyadditionssilikone haben meist eine relativ kurze Topfzeit. So setzt die Vernetzung im Falle von Wacker Elastosil P7670 bereits nach 20 Minuten nach der Vermischung der Komponenten ein. Abgeschlossen ist sie nach 40 Minuten. Dies bedeutet, dass für solch ein Silikon ohne chemische Modifizierung eine vorzeitige Zusammenführung der Komponenten zu vermeiden ist.

Um eine geeignete Auswahl Beschichtungsverfahren dank deren Vielfalt treffen zu können, wurde darauf geachtet, dass diese einen gleichmäßigen Silikonauftrag auf großflächige Substrate (bis DIN A5) erzielen, ohne dass eine chemische oder sonstige Modifizierung der Silikone notwendig ist. Dennoch hat die folgende Auswahl keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da es nur Verfahren getestet werden konnten, die an der Technischen Universität Darmstadt zugänglich waren. Diese werden im Folgenden näher betrachtet.

<sup>6</sup> „About two dozen major coating applicator techniques can potentially apply any given coating solution to a web“ [20]

## Spin-Coating

*Spin-Coating* (engl. für Drehschleudern) ist eine bekannte Methode zum Auftrag von Fluiden auf ein planares Substrat. Dieses Verfahren ist weit verbreitet in der Wissenschaft, wenn organische Substanzen in gleichmäßigen dünnen Schichten auf planare Substrate aufgetragen werden müssen. In der Industrie findet Spin-Coating seine Anwendung bei der Herstellung von Fotoresistschichten in der Mikroelektronik [47, 50]. Oft wird Spin-Coating dank seiner hohen Wiederholbarkeit und Genauigkeit als ein Referenzverfahren zur Validierung anderer Verfahren herangezogen.

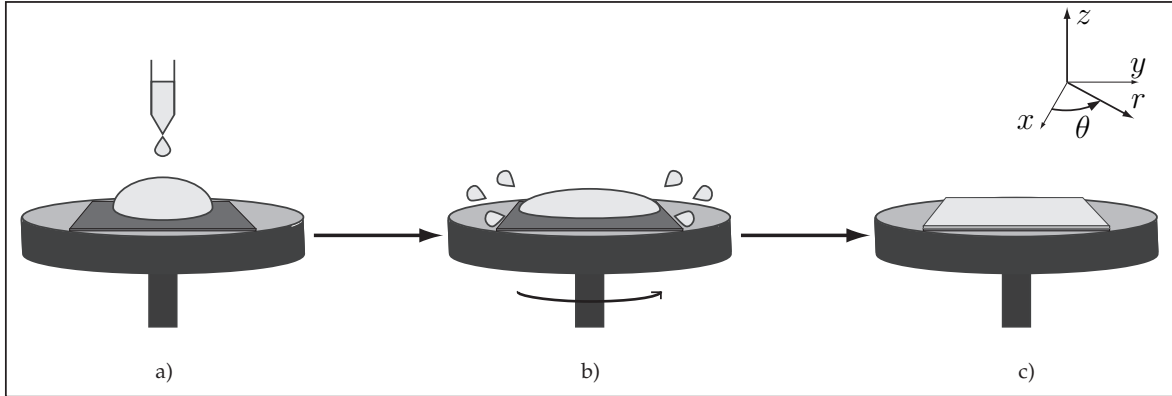


Abbildung 2.16.: Schematische Darstellung des Spin-Coatings. a) Fluiddosierung auf das Substrat. b) Durch die Zentrifugalkräfte werden das Fluid nach außen gedrückt. c) Dünne homogene Schicht als Ergebnis.

Die Prozessschritte des Spin-Coatings sind in Abbildung 2.16 dargestellt. Das aufzutragende Fluid wird auf ein flaches Substrat (meistens Laborglas oder PET-Folie) dosiert, das in einem Substrathalter befestigt ist (Abb. 2.16 a)). Anschließend wird der Substrathalter radial beschleunigt, bis die gewünschte Drehgeschwindigkeit erreicht wird. Dabei entstehen Zentrifugalkräfte, die das Fluid gleichmäßig auf dem Substrat verteilen und Fluidüberschüsse vom Substrat in die Umgebung schleudern (Abb. 2.16 b)). Der Film wird mit steigender Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  immer dünner, bis die Gleichgewichtsschichtdicke erreicht wird (Abb. 2.16 c)). Bei Additionssilikonem ist die Verdampfung bei der Vernetzung sehr gering und kann vernachlässigt werden. Daher gilt für deren Verarbeitung im Spin-Coating das physikalische Modell ohne Berücksichtigung der Lösemittelverdampfung [50]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\omega^2 \rho}{3\eta} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r^2 h^3) \quad (2.2)$$

Gleichung 2.2 gibt die Abhängigkeit der resultierenden Schichtdicke  $h$  von der Zeit  $t$ , der Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  und der Dichte  $\rho$  und der dynamischen Viskosität  $\eta$  des Fluids an jedem Punkt  $(r, \theta, z)$  des Zylinderkoordinatensystems an. Die resultierende Schichtdicke hängt also von der Rotationsgeschwindigkeit, der Fluidviskosität und von der Schleuderdauer ab. Die Schleuderdauer hat nur einen bedingten Einfluss auf die Schichtdicke. Nach dem die Gleichgewichtsschichtdicke erreicht wurde, hat die Fortsetzung des Schleuderns keine Auswirkung mehr. Lediglich bei viel zu kurzer Dauer wird die gewünschte Schichtdicke nicht erreicht.

Trotz der aufgezählten Vorteile, wie sehr homogene Schichten und hohe Wiederholbar-

## 2. Dielektrische Stapelaktoren

keit und Genauigkeit, hat Spin-Coating auch Nachteile. Wegen hoher Drehzahlen (bis zu 10000 U/min) können in konventionellen Spin-Coating-Geräten nur kleine Substrate beschichtet werden. Je nach Fluid können Abmessungen größer  $5 \times 5$  cm kritisch werden. Bei viel zu großen Substraten entstehen Schichtverdickungen an den Substraträndern. Die Verarbeitung dickflüssiger Fluide im Spin-Coating ist oft unwirtschaftlich, denn es werden höhere Drehzahlen für die Herstellung dünnerer Schichten benötigt. Dies kann dazu führen, dass bis zu 95% des Fluids als Abfall vom Substrat geschleudert wird [132].

Vor allem die Größeneingrenzung macht den Einsatz von konventionellen Spin-Coating-Geräten für die Herstellung großflächiger (ca. DIN A5) Aktoren undenkbar. Dennoch kann dieses Verfahren zur Herstellung kleinerer Aktoren benutzt werden.

### Filmziehen

Eine weitere sehr einfache Beschichtungsmethode ist das *Filmziehen*. Dieses Verfahren ist auch als *Blade-Coating*, *Rakelbeschichtung* oder *Tischrakel* in der Literatur zu finden [133, 20, 35]. Das Kernelement dieses Verfahrens ist eine Rakel (selten auch Messer genannt), meist aus einem steifen Material (beispielhaft Metall). Vor dem Beschichtungsvorgang wird die Rakelhöhe und der Rakelwinkel  $\varphi$  eingestellt.

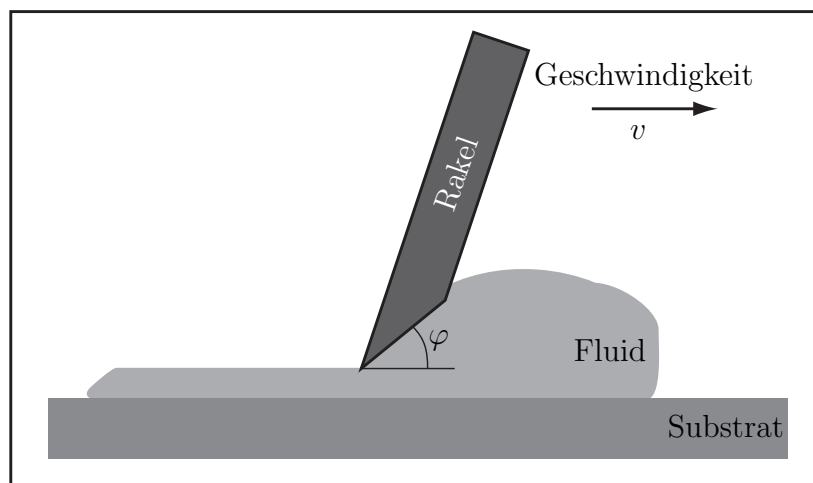


Abbildung 2.17.: Grundprinzip des Filmziehens. Das Fluid wird von einer Rakel (selten auch Messer genannt) mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  über das Substrat gezogen.

Trotz des einfachen Arbeitsprinzips des Filmziehens ist die Modellierung des Verfahrens nicht trivial. Mehrere wissenschaftliche Arbeiten, beispielsweise von SULLIVAN ET AL., MITSOULIS ET AL. und QUINTANS CAROU ET AL., beschäftigen sich seit Jahren mit der Modellierung des Filmziehens [103, 84, 138, 140]. STRAUSS belegt, dass die Strömung dabei sowie vom newtonschen, als auch vom viskoelastischen Verhalten der Flüssigkeit geprägt wird [138]. Ein einfaches Modell bieten SIGINER ET AL. [126] in ihrem Buch an. Demnach wird die resultierende auf die Rakel wirkende Kraft  $F$  durch den Fluidmassenstrom  $\dot{m}$ , die Beschichtungsgeschwindigkeit  $v$  und den Rakelwinkel  $\varphi$  bestimmt (s. Abb 2.17):

$$F = \frac{\dot{m}v(1 + \cos\varphi)}{\sin\varphi} \quad (2.3)$$

Eine schematische Darstellung der flachen Variante des Filmziehens in der am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren vorhandenen Ausführung ist Abbildung 2.18 zu entnehmen. Der Substratbogen wird dabei auf einem Tisch befestigt. Das zu verdru-ckende Fluid wird vor die Rakel auf das Substrat dosiert. Die Rakel wird anschließend automatisch mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit über das Substrat gezogen oder geschoben.

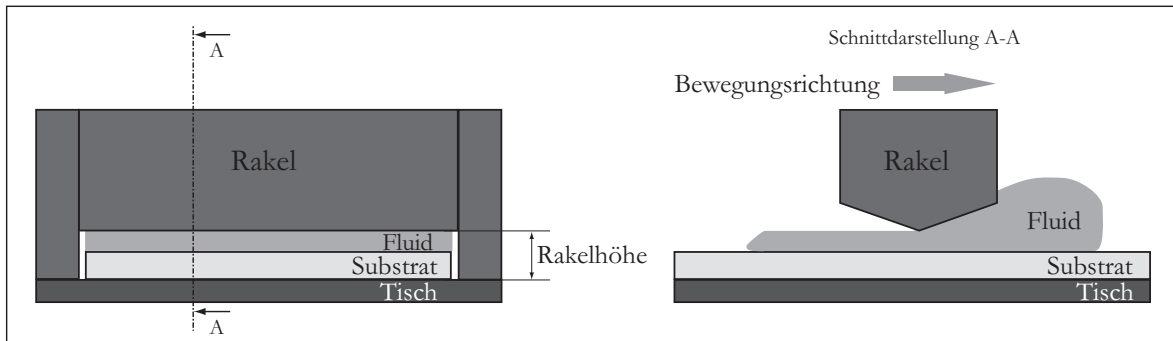


Abbildung 2.18.: Schematische Darstellung von Filmziehen auf einem flachen Substrat. Links frontale Ansicht, rechts seitliche Ansicht als Schnittdarstellung. Das Substrat liegt auf dem Tisch. Das Fluid wird vor die Rakel dosiert. Die Rakel bewegt sich am Substrat entlang und hinterlässt eine Schicht hinter sich.

Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Oberflächenkräften von Substrat, Fluid und Rakel entspricht die Rakelhöhe nicht der tatsächlichen Nassschichtdicke der resultierenden Schicht. Letztere kann „um Größenordnungen“ kleiner werden [132]. Die Rakelgeschwindigkeit spielt ebenfalls eine große Rolle für die Qualität der resultierenden Schicht.

Eine alternative Ausführung des Blade-Coatings ist der Rolle-zu-Rolle-Aufbau (Abb. 2.19). Dabei wird die Schicht auf eine Substratbahn aufgebracht. Das zu beschichtende Fluid befindet sich in einem Reservoir. Der Abstand zwischen der Rakel, in dieser Form auch Messer genannt, und der Substratbahn bestimmt, wie bei dem planaren Aufbau, die Schichtdicke.

Oben aufgeführte Druck- und Beschichtungsverfahren wurden aufgrund theoretischer Überlegungen für Herstellung von Silikonschichten für DEA als geeignet definiert. Jedes Verfahren stellt Schichten unterschiedlicher Qualität her. Die Schichtqualität hängt von eventuellen Schichtdefekten ab, deren Vorhandensein und Ausprägung unter anderem von der Herstellungsmethode abhängig sind. Dieses Thema wird im folgenden Kapitel behandelt.

In Kapitel 2 wurden die Grundlagen zum Thema dielektrische Stapelaktoren und deren Dielektrikumschichten aus Silikon vorgestellt. Nach theoretischen Überlegungen wurden einige Silikone und Herstellungstechniken für die Isolationsschichten basierend auf Druck- und Beschichtungsverfahren ausgewählt mit dem Ziel, Herstellung von dünnen großflächigen Silikonschichten zu ermöglichen. Um die Eigenschaften der resultierenden Schichten und deren Charakterisierung handelt es sich in Kapitel 3.

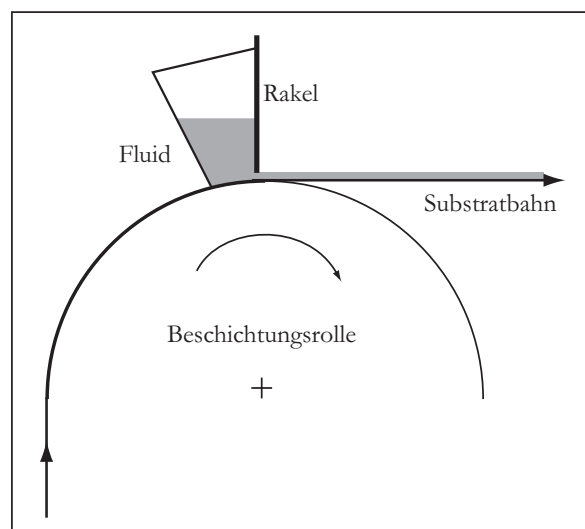


Abbildung 2.19.: Schematische Darstellung von Filmziehen auf einer Substratbahn. Das Fluid wird in ein Reservoir dosiert. Die Substratbahn wird anhand der Beschichtungsrolle transportiert. Die Rakel bestimmt die Schichtdicke.



# 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

In Kapitel 2.3 wurden einige Druck- und Beschichtungsverfahren ausgewählt, die für die Herstellung isolierender Silikonschichten für DEA geeignet sind. Jedes Herstellungsverfahren liefert abhängig von den Wechselwirkungen der Prozessparameter, dem verwendeten Material und den Umgebungsbedingungen unterschiedliche Resultate bzgl. der produzierten Schicht. Dieses Zusammenspiel hat einen erheblichen Einfluss auf die Schichtqualität. Im ungünstigen Fall entstehen Schichtdefekte. Um diese und die Schicht(in)homogenität geht es in Unterkapitel 3.1. Existierende Methoden zur Charakterisierung sowie die bei deren Anwendung entstehenden Herausforderungen bei Charakterisierung von Silikonschichten beschreibt Unterkapitel 3.2. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode auf Basis der Schattenabbildung, der das Phänomen der Lichtbrechung in unterschiedlichen Medien zu Grunde liegt, wird in Unterkapitel 3.3 erläutert.

## 3.1. Defekte und Homogenität dünner Silikonschichten

Bei der Herstellung dünner Polymerschichten, egal ob mit Druck- oder Beschichtungsverfahren, können Schichtdefekte entstehen. Viele davon werden durch die Wechselwirkung physikalischer Phänomene, wie Oberflächenspannung, Benetzung und Viskosität, verursacht. Einen erheblichen Einfluss auf diese Defekte haben ebenso die Prozessparameter. WICKS [158] bietet eine detaillierte Übersicht und Klassifizierung der Schichtdefekte. Einige Beispiele hierzu sind folgende Defekte (in Klammern sind die englischen Bezeichnungen angegeben, da die meisten Quellen zu diesem Thema englischsprachig sind):

- Einebnung (Leveling)
- Absenkung und Laufspuren (sagging and drip marks)
- Kriechen, Kraterbildung (crawling, cratering)
- Faltenbildung (wrinkling)
- Bildung und Zerplatzen von Gasblasen (bubbling and popping)
- Schäumen (foaming)

Im Folgenden werden für Silikonschichten typische Defekte dargestellt. Dabei liegt der Entstehungsmechanismus der Defekte nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Alle oben aufgeführten Defekte führen zu ungleichmäßigen Schichtdicken. Deshalb werden

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

diese im Weiteren unter dem Begriff „Schichtdickenvariationen“ zusammengefasst. Sich in Grenzen haltende Schichtdickenvariationen haben meistens keinen schwerwiegenden Einfluss auf die Funktion des Aktors, sind dennoch möglichst zu vermeiden, da sonst kein gleichmäßiger mechanischer Druck bei Anlegung elektrischer Spannung an die Elektroden gewährleistet werden kann (s. Formel 2.1 auf Seite 26).

Eine weitere Defektklasse bilden „Einschlüsse“. Hierbei handelt es sich um fremdartige Substanzen, die in die Schicht gelangen. Meistens sind das Staub- und Schmutzpartikel, die aus der Umgebungsluft auf die nasse Schichtoberfläche absinken, falls der Herstellungsprozess in einer nicht nahezu staubfreien Umgebung stattfindet. Weitere Einschlüsse können durch eine unvollständige Entgasung oder unsaubere Dosierung des Materials verursacht werden. Vor allem bei hochviskosen Fluiden, wie Silikonen, tritt dieser Effekt vermehrt auf.

Ein besonderer Defekt, welcher für mehrkomponentige Fluide wie Silikone typisch ist, ist die fehlerhafte Vernetzung an manchen Stellen. Diese kann durch eine schlecht gewährleistete Vermischung verursacht werden. Mögliche Gründe dafür können das nicht genau eingehaltene Mischungsverhältnis oder Wechselwirkung von Silikon mit anderen Substanzen (z.B. Lösemittelreste auf dem Substrat) sein. Die Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Vernetzung verringert sich bei zunehmendem Automatisierungsgrad der Fertigungsanlage, denn so wird der Einfluss des Bedieners und ggf. seiner Fehler geringer.

Im Gegensatz zur Schichtdickenvariation, können letztere Defektklassen dem Aktor einen erheblichen Schaden hinzufügen. Im Falle von Einschlüssen kommt es bzgl. der Schichtfunktion auf das Größenverhältnis der Schichtdicke des Einschlusses und seiner Lage in der Schicht an. Im schlimmsten Fall kann solch ein Einschluss zum Kurzschluss führen. Die nicht vernetzten Stellen erlauben es der Silikonschicht dann nicht mehr, ihre isolierende Funktion zu erfüllen und machen den Aktor somit unbrauchbar. Die typischen Defekte in einer Silikonschicht in einem Aktor sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Schichtdefekte und Fehlstellen in den dielektrischen Schichten von DEA führen dazu, dass die Aktoren weit unterhalb der theoretisch möglichen Durchbruchfeldstärke des Dielektrikums (Silikons) betrieben werden, um elektrisches Durchschlagen zu vermeiden [60].

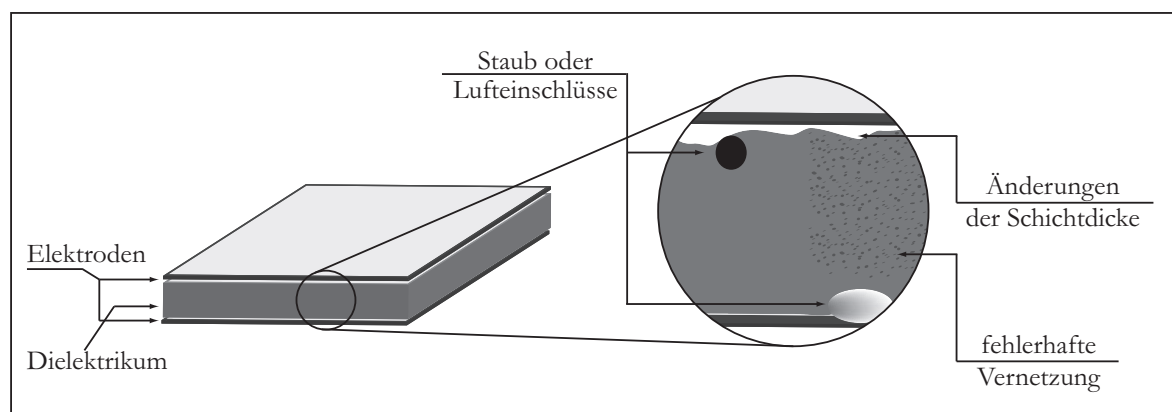


Abbildung 3.1.: Schematisch dargestellte typische Defekte der Silikonschichten am Beispiel eines Aktors: Luft- oder Staubeinschlüsse; fehlerhafte, nicht vollständige Vernetzung; Variationen der Schichtdicke.

In der Druckbranche ist der Begriff *Schichthomogenität* im Zusammenhang der Charakterisierung und Beschreibung von Schichten üblich. Dieser wird sehr oft zur Beschreibung der Schichtqualität herangezogen, allerdings wird der Begriff selbst dabei meistens nicht definiert [12, 15, 57, 101, 151]. HAAS definiert eine Schicht als homogen, wenn „sie keine sichtbaren Unregelmäßigkeiten“ aufweist [42]. STAHL definiert Schichthomogenität als „Ebenheit der Schicht, also die Schwankung der Schichtdicke“ [133]. Dabei wird die Schichtmorphologie (Zusammensetzung der Schicht) nicht berücksichtigt. Diese beiden Definitionen passen nicht ganz zum Kontext der vorliegenden Arbeit. Daher werden die Begriffe *Schichtinhomogenität* und *Schichthomogenität* für diese Arbeit wie folgt definiert:

- *Schichtinhomogenität/Inhomogenität* ist ein Sammelbegriff bzw. ein Synonym für Schichtdefekte. So können beispielsweise Staubeinschlüsse oder Dickenvariationen als Schichtinhomogenitäten bezeichnet werden.
- *Schichthomogenität/Homogenität* ist ein Maß für die Qualität der Schicht, ihre Ebenheit, Dickenverteilung und Anwesenheit und Typen von Schichtdefekten.

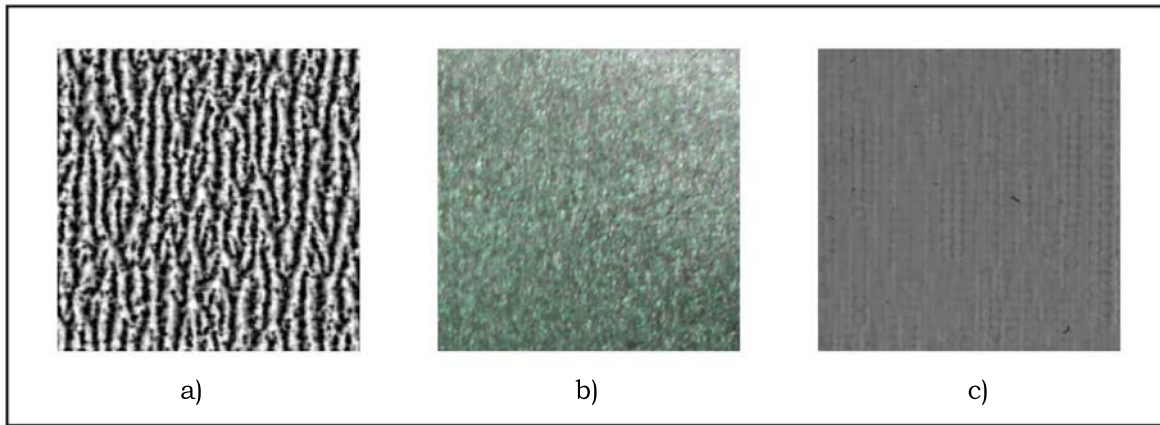


Abbildung 3.2.: Beispiele der Inhomogenitäten in gedruckten Schichten. a) Durch Farbspaltung bedingte sogenannte Baumrindstruktur [153]. b) Wolkigkeit in einer gedruckten Effektpigmentschicht [42]. c) Inhomogenitäten in einer gedruckten Polystyrolschicht [133].

Inhomogene Schichten sind Folgen der Schichtdefekte und werden im grafischen sowie im funktionalen Druck zum Problem. Im grafischen Druck verursachen die Inhomogenitäten einen schlechteren visuellen Eindruck vom Druckergebnis. Solche Defekte wie Wolkigkeit oder Baumrindstrukturen fallen vor allem bei Volltonflächen auf (Abb. 3.2 a)-b)). Im funktionalen Druck können die Inhomogenitäten vor allem die Performance der Schichten negativ beeinflussen. Ein Beispiel einer inhomogenen funktionalen Schicht (Polystyrol) ist in Abbildung 3.2 c) zu sehen.

Um eine Aussage über die Schichthomogenität treffen zu können, bedarf es Schichtcharakterisierung. Bei der Schichtcharakterisierung gilt es herauszufinden, welche Defekte in welchem Maß vorhanden sind, wie homogen die Schichtdicke ist. In der Druckindustrie etablierten sich für diese Zwecke optische Methoden. Dabei sind diese Methoden für den grafischen Druck ausgelegt. Im funktionalen Druck ist die Anzahl der optischen Methoden begrenzt, die existierenden Methoden sind nicht für alle Materialien geeignet. Das Thema optische Charakterisierung von Silikonschichten wird im Folgenden behandelt.

## 3.2. Optische Messungen transparenter Silikonschichten

Gedruckte Schichten können auf unterschiedliche Weisen charakterisiert werden. Im grafischen Druck erfolgt dies meistens visuell oder mit diversen Geräten, die Korrelate der menschlichen Wahrnehmung (beispielsweise Farbdichte oder Glanz) erfassen. Im funktionalen Druck wird die Performance des Erzeugnisses wie Leitfähigkeit oder elektrischer Widerstand gemessen. Für eine weitgehende Charakterisierung von gedruckten Schichten werden auch Informationen über die Schichttopografie (Schichtdicke, Schichthomogenität) benötigt. Im Folgenden werden einige Methoden zur Vermessung der Schichttopografie vorgestellt, die sich allgemein in destruktive und nicht destruktive unterteilen lassen.

**3D-Profilometrie** Eine weit verbreitete Methode der Schichtcharakterisierung hinsichtlich der Schichtdicke und -homogenität ist die 3D-Profilometrie. Die entsprechenden Geräte nennen sich 3D-Profilometer. Bei dieser Methode werden die Schichten dreidimensional optisch oder mechanisch abgetastet. Mechanische Geräte tasten die Proben linienweise ab. Bei der taktilen Abtastung werden Messnadeln benutzt, die eventuell die Schicht beschädigen können, was bei funktionalen Schichten fatal sein kann.

Alternative zu den mechanischen bieten die optischen Abtastmethoden. Optische Profilometer können flächenweise abtasten, allerdings ist der Messfleck dabei sehr klein (wenige Quadratmillimeter). Für die Ermittlung der absoluten Schichtdicke ist eine Abtastung der Schicht und des unbedruckten Substrats notwendig. Hierfür bieten sich Messungen am Schichtrand an. So können bedruckte und unbedruckte Bereiche vom Messfleck erfasst werden. Oft ist die Schichtdicke einer gedruckten Schicht am Rand höher als die Schichtdicke im Probeninneren. Deshalb werden mehrere Bilder aufgenommen, die von der Grenze Schicht/Substrat in das Probeninnere gehen. Die Aufnahmen werden anschließend von der Software zusammengefügt. Dieser Prozess nimmt meistens sehr viel Zeit und Rechenleistung in Anspruch. Alternativ können Bereiche vermessen werden, die weit vom Schichtrand entfernt sind, indem ein Kratzer in die Schicht eingebracht wird. So gelangen beide Oberflächen - Substrat und Schicht - in den Messfleck. Das ist eine destruktive Methode. Gefährlich ist dabei selbst das Kratzen, da es unter Umständen das Substrat beschädigen und so die Messung verfälschen kann. Optische Abtastmethoden sind durch konfokale Mikroskopie und Interferometrie vertreten. Sie werden im Folgenden erläutert.

Das Funktionsprinzip der konfokalen Mikroskopie wurde von HAMILTON [48] beschrieben und besteht darin, dass die Fokusse der Beleuchtung und des Detektors in einer Ebene liegen. Im Strahlengang lassen Lochblenden nur einen ganz dünnen Lichtstrahl durch. Es wird eine extrem kleine Tiefenschärfe erreicht, sodass eine gestochen scharfe Abbildung von den Punkten in der Fokusebene am Detektor entsteht. Die zu vermessende Probe wird so Punkt für Punkt abgetastet. Für eine 3D-Messung (Schichtdicke) ist eine zusätzliche Abtastung in  $z$ -Richtung notwendig. Das Ergebnis einer konfokalen Messung einer Silikonschicht ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Quer im Topographie-Diagramm ist ein Schichtrand eines für die Messung eingebrachten Kratzers sichtbar. Dieser löst sich ab und rollt sich zusammen durch die hohe Elastizität des Silikons. Er

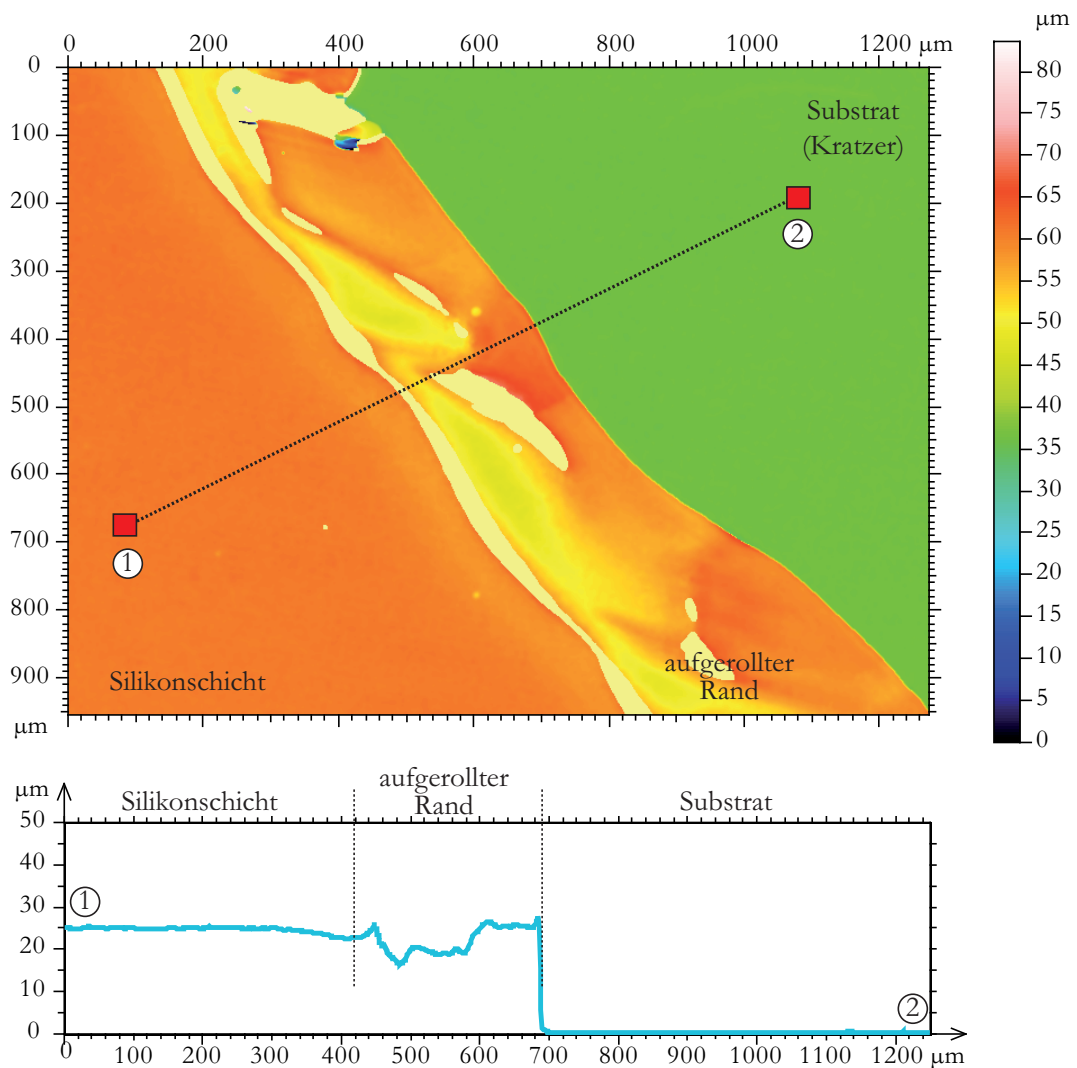


Abbildung 3.3.: Konfokale Schichtaufnahme einer mit Filmziehen hergestellten Silikonschicht. Topographie-Diagramm oben und Profilschnitt entlang der Schnittlinie zwischen den Punkten 1 und 2 unten. Im Topographie-Diagramm ist ein zusammengegerollter Schichtrand zu sehen.

nimmt viel Platz im Bildausschnitt ein und verursacht eventuell Schichtunebenheiten. Zur Ermittlung der Schichtdicke wird ein Profilschnitt benötigt. Dieser wird entlang einer Schnittlinie geführt, die zwei frei wählbare Punkte auf der Schicht und auf dem Substrat (1 und 2 in Abbildung 3.3) verbindet.

Zur Oberflächenvermessung reflektierender Proben wird die Interferometrie eingesetzt. Der Hauptunterschied zur konfokalen Mikroskopie liegt in der Bauweise der speziellen Objektive [11]. Diese besitzen neben der Standardoptik zusätzlich einen integrierten Referenzspiegel. Der optische Strahlweg von der Probe wird mit dem des Referenzspiegels kombiniert. Je nach Weglänge verursachen die reflektierten Strahlen beider Oberflächen konstruktive oder destruktive Interferenz, die sich in von einer Kamera detektierbaren Mustern äußert. Diese Muster korrelieren mit der Probenoberfläche.

Ein wichtiger Schritt bei einer optischen 3D-profilometrischen Messung ist das so ge-

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

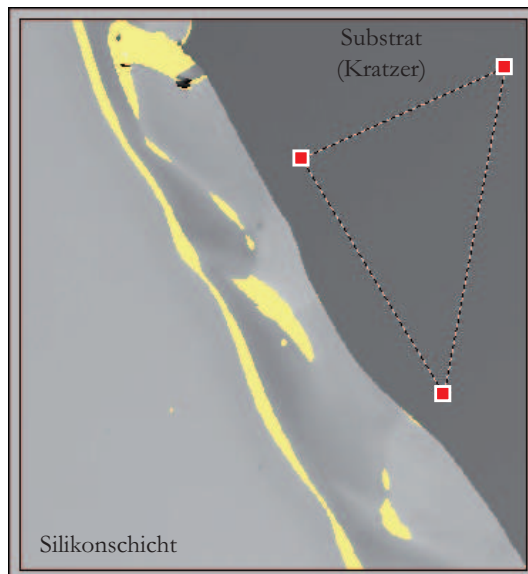


Abbildung 3.4.: Leveling bei einer optischen 3D-profilometrischen Messung. Es werden drei Punkte auf dem Substrat ausgewählt, die die Ebenenausrichtung bestimmen.



Abbildung 3.5.: Sensofar PLu Neox Optical Profiler [58].

nannte Leveling. Beim Leveling wird die Messebene durch Drehung ausgerichtet, so dass eine Fläche entsteht, auf der sich die Punkte des unbedruckten Substrats auf einer Höhe befinden [133] (Abb. 3.4). Es ist also wichtig genügend unbedruckte Fläche auf der Probe zu haben, um eine genauere Messung durchzuführen. Bei den Proben auf Foliensubstraten muss sehr darauf geachtet werden, dass bei der Probenherstellung die für die Folien maximal erlaubte Temperatur bei den technologischen Schritten nicht überschritten wird. Bei höheren Temperaturen fangen die Folien an zu fließen, was zu plastischen Verformungen in der Folie führt und so zu einer hohen Welligkeit. Diese kann zum fehlerhaften Leveling und so zu verfälschten Messergebnissen führen.

Sowohl die konfokale Mikroskopie als auch die Interferometrie sind am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren im Messgerät Sensofar PLu Neox vereint (Abb. 3.5). Seine Bauart erlaubt es, die Abtastung in der  $z$ -Richtung ohne mechanische Bewegung auszuführen. Dazu dient ein reflektives schaltbares Display. Die Messung der hochtransparenten, kaum reflektierenden Silikonschichten anhand Interferometrie gestaltet sich extrem schwierig. Bei der konfokalen Messung von Silikonschichten entstehen Störreflexionen an der unteren Schicht- bzw. Substratoberfläche. Diese sind schwer auszuschließen und resultieren in verfälschten Messwerten. Zur Vermessung einer ganzen Probe werden mehrere einzelne Aufnahmen zusammengefügt. Die gemessene Fläche in Abbildung 3.3 beträgt  $1,3 \text{ mm}^2$ , die Dauer dieser Messung beträgt ca. 15 s. Es lässt sich ausrechnen, dass eine Messung einer DIN A5 großen Probe (Fläche  $31080 \text{ mm}^2$ ) ca. 4 Tage in Anspruch nehmen würde.



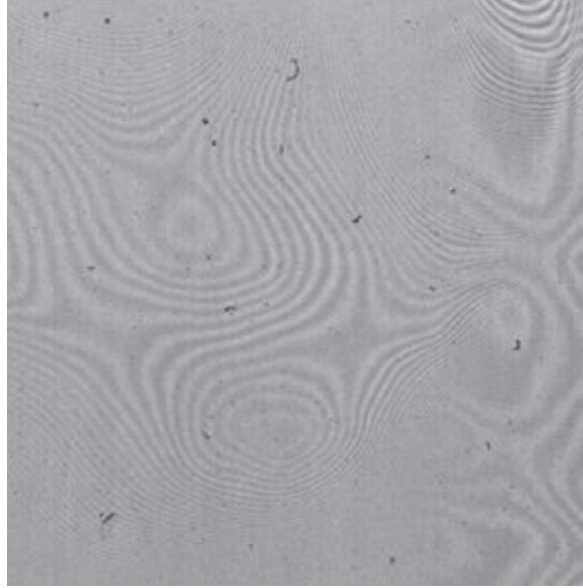


Abbildung 3.6.: Newtonsche Ringe zwischen einer Folie auf dem Scannerglas (kontrastverstärkte Scanneraufnahme) [133].

**Absorptionsmessungen** STAHL [133] entwickelte eine Charakterisierungsmethode für im Tiefdruck hergestellte Polymerschichten, die auf Lichtabsorption basiert. Die Schichtdicken liegen bei ca.  $1\ \mu\text{m}$ . Als Substrat wurde eine einseitig beschichtete PET-Folie (Hostaphan GN4600) verwendet. Dabei wird ein handelsüblicher Scanner Epson Perfection V750 Pro für die Charakterisierung großflächiger Proben (ca. DIN A5) benutzt. Da die verwendeten Polymerlösungen (Polystyrol, Poly(methylmethacrylat)) im trockenen Zustand eine sehr niedrige Lichtabsorption aufweisen, wurde bei der Schichtfertigung ein Small-Molecule-Farbstoff BASF Lumogen Rot F305 in sehr geringen Konzentrationen (0,5-1 gew.%) beigemischt, der bei der Lichteinstrahlung bestimmter Wellenlängen fluoresziert. Durch sein starkes Absorptionsvermögen werden Messungen der Lichtabschwächung im Durchlichtmodus mit dem Scanner ermöglicht. Beim Auflegen der Probe auf das Scannerglas kann ein Fehler entstehen, der als Fizeau-Streifen oder Newtonsche Ringe bekannt ist (Abb. 3.6) [99]. Dieser äußert sich in dunklen und hellen Streifen- oder Ringmustern, die auf der Probe sichtbar sind und das Messergebnis maßgeblich verfälschen können. Die Muster werden durch konstruktive und destruktive Interferenz verursacht, die im dünnen Luftspalt zwischen dem Scannerglas und der Substratfolie stattfindet. Ausgeprägt ist dieses Phänomen bei hoher statischer Aufladung der Oberflächen. Diese führt dazu, dass sich die Folie (Probe) beim Auflegen auf das Scannerglas unkontrolliert „ansaugt“. In diesem Fall ist eine antistatische Behandlung der Folie notwendig. Eine andere Lösung ist ein Folienhalter, in dem die Folie eingespannt wird und so einen konstanten definierten Abstand zum Scannerglas behalten kann.

Diese Methode kann erfolgreich zur Vermessung von Licht absorbierenden Proben herangezogen werden. Innerhalb eines Messvorgangs kann die Probe ganzflächig erfasst werden (bei Verwendung von Epson Perfection V750 Pro bis über DIN A4). Mit bekannten Absorptionskoeffizienten<sup>1</sup> des Substrats und der Schicht können die Schicht-

---

<sup>1</sup>Der Absorptionskoeffizient wird oft vom Hersteller angegeben. Alternativ kann er anhand des Lambert-Beerschen Gesetzes bestimmt werden [64, 53].

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

dicke sowie die Schichthomogenität ermittelt werden.

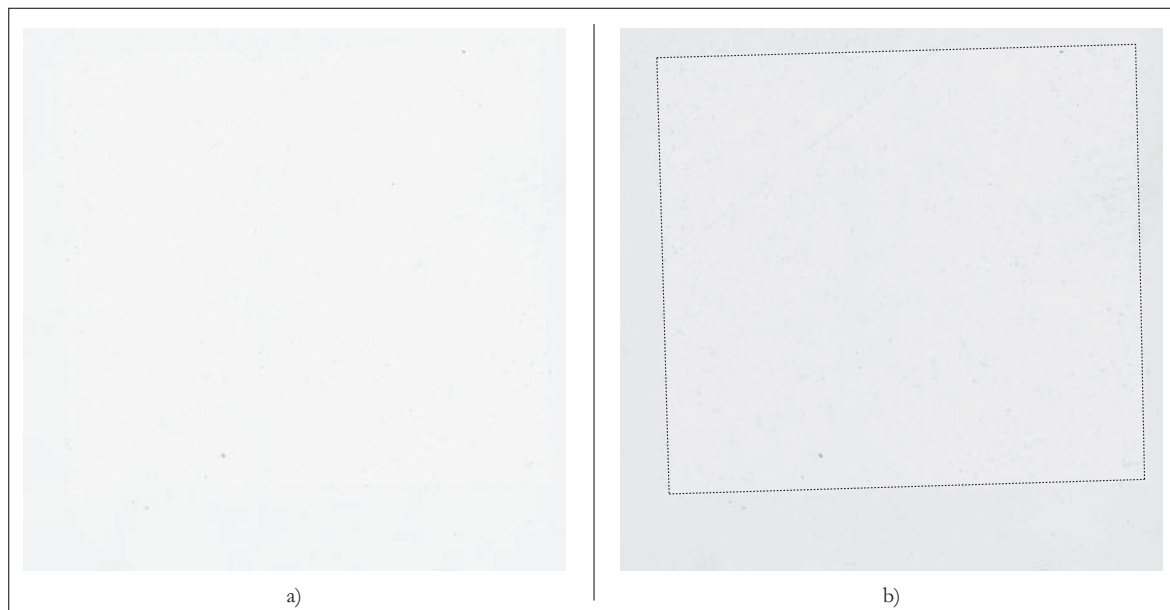


Abbildung 3.7.: Scanneraufnahme einer im Siebdruck hergestellten Silikonschicht auf Hostaphan-Substrat. a) Ohne Anwendung jeglicher Bildkorrekturen. b) Mit verstärktem Bildkontrast und mit Linien umrandetem Silikonfeld zur Veranschaulichung .

Beim Anwenden der Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten treten jedoch Probleme auf. Abbildung 3.7 a) zeigt eine Aufnahme einer im Siebdruck hergestellten Silikonschicht auf einem Hostaphan-Substrat, die mit demselben Scanner Epson Perfection V750 Pro aufgenommen wurde. Die Schicht und das Substrat schwächen das einfallende Licht kaum ab, da das Transmissionsvermögen des Silikons im sichtbaren Spektrumbereich (400 – 760 nm) bei fast 100% und das Transmissionsvermögen von Hostaphan über 90% beträgt [155, 86]. Dies bedeutet, dass das Silikon nicht das für eine Messung notwendige Absorptionsvermögen<sup>2</sup> besitzt. Um die Silikonschicht trotz ihres überaus geringen Absorptionsvermögens im Bild sichtbar zu machen, wurde das mit Silikon bedruckte Feld mit Linien umrandet und der Bildkontrast verstärkt (Abb. 3.7 b)). Die Abbildung macht ersichtlich, dass diese Methode sich nicht für die Charakterisierung dünner Silikonschichten ohne Farbstoffbeimischung eignet.

**Imaging color reflectometry (ICR)** (*engl.* bildgebende Farbreflektometrie) ist eine neue optische Messmethode für transparente Schichten entwickelt von BORNE-MANN [12]. Diese Methode wurde erfolgreich für Messungen unterschiedlicher im Tiefdruck hergestellter Schicht (Schichtdicken unter  $1\mu\text{m}$ ) auch in großer lateraler Ausdehnung implementiert. Ihr zugrunde liegt ein Effekt, bei dem sonst transparente Schichten bei einer bestimmten geometrischen Anordnung der Lichtquelle und des Beobachters sichtbar werden. Dieses Phänomen entsteht durch die Interferenz dünner Schichten. Das von der Lichtquelle emittierte Licht fällt dabei unter dem Winkel  $\theta$  auf die Schicht ein. Der Sensor wird ebenso unter dem Winkel  $\theta$  angeordnet (Abb. 3.8). Die Bedingung für die Nutzung der Methode sind bekannte, über die Messung konstant bleibende und

---

<sup>2</sup>Transmissions-, Absorptions- und Reflexionsvermögen eines Materials ergeben in Summe 100% [4].



sich erheblich voneinander unterscheidende Brechungsindizes<sup>3</sup> der einzelnen Schichten (im einfachsten Fall: Substrat und Schicht). Diese Bedingung ist im Falle der Benutzung von gängigen Substraten wie Hostaphan-Folien und Silikonen nicht erfüllt, da die Brechungsindizes fast gleich sind (s. Tabelle 3.1). Zudem betragen die Silikonschichtdicken mehrere bis mehrere zehn Mikrometer. Dies macht die Anwendung der Methode zur Vermessung der Schichten in gegebenen Bedingungen unmöglich.

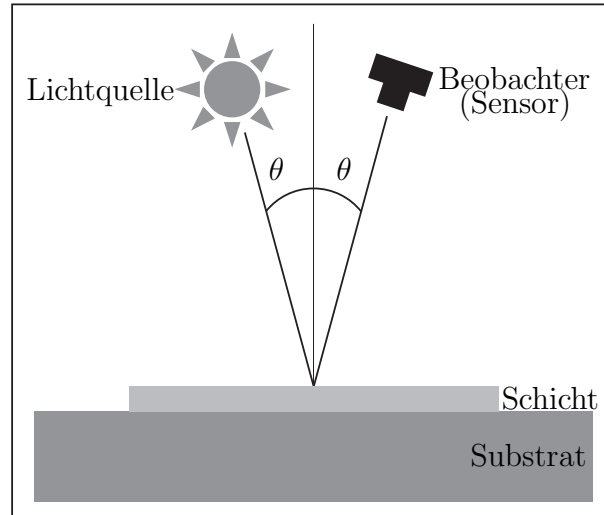


Abbildung 3.8.: Schematische, vereinfachte Darstellung der geometrischen Anordnung der ICR-Methode. Die Lichtquelle und der Beobachter (ein Sensor) sind unter gleichem Winkel  $\theta$  zum Lot ausgerichtet.

Tabelle 3.1.: Brechungsindizes von Silikonen und PET (Hostaphan) [80, 55].

Material	Brechungsindex
PDMS (Silikon)	1,54 – 1,55
Hostaphan	1,60

## 3.3. Optische Messmethode auf Basis der Schattenabbildung

Die Probleme, die sich beim Einsatz der Messmethoden aus Kapitel 3.2 bei Silikonschichten ergeben, zeigen, dass eine alternative Methode zur optischen Erfassung von Silikonschichten notwendig ist. Dabei scheint die Schattenabbildung von Interesse zu sein. Diese Methode basiert auf dem Phänomen der Lichtbrechung, das im Folgenden erläutert wird.

### 3.3.1. Phänomen der Lichtbrechung

In vorliegender Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der so genannten geometrischen Optik, die ein Spezialfall der Wellenoptik ist. Von der geometrischen Optik wird gesprochen,

<sup>3</sup>Auf den Begriff Brechungsindex/Brechzahl wird im Kapitel 3.3.1 näher eingegangen.

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

wenn die Wellenlänge  $\lambda$  vernachlässigbar klein gegenüber den Abmessungen der Elemente ist, aus denen das optische System besteht [99]. Die geometrische Optik beschreibt unter anderem das physikalische Phänomen der Lichtbrechung.

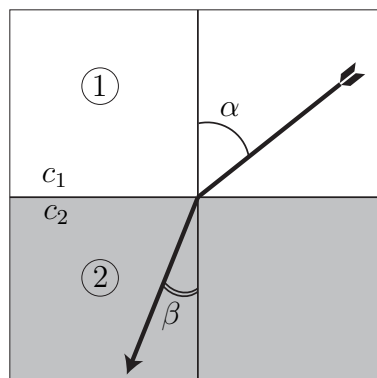


Abbildung 3.9.: Brechung. Der Lichtstrahl taucht aus dem Medium 1 mit Lichtgeschwindigkeit  $c_1$  ins Medium 2 mit Lichtgeschwindigkeit  $c_2$ , wobei  $c_2$  geringer ist als  $c_1$ .  $\alpha$  ist der Eintrittswinkel,  $\beta$  ist der Austrittswinkel.

*Brechung* wird durch den Unterschied der Lichtgeschwindigkeiten in zwei Medien erklärt, die durch eine Grenzfläche getrennt sind. Dadurch wird ein Lichtstrahl gebrochen. Abbildung 3.9 stellt den einfachsten Fall der Brechung dar. Hier tritt ein Lichtstrahl aus dem Medium 1 mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_1$  in das Medium 2 mit Lichtgeschwindigkeit  $c_2$  ein. Der Einfallswinkel beträgt  $\alpha$ . Durch den Lichtgeschwindigkeitsunterschied wird der Strahl gebrochen, sodass er dann unter dem Winkel  $\beta$  zum Lot verläuft. Der Quotient der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  und der im betrachteten Medium  $c_i$  wird als *Brechzahl* oder *Brechungsindex*  $n_i$  bezeichnet und ist somit eine Materialkonstante<sup>4</sup>:

$$n_i = \frac{c_0}{c_i} \quad (3.1)$$

Brechung wird durch das Snelliussche Brechungsgesetz mathematisch beschrieben (Formel 3.2) [99]. Demnach ist das Verhältnis der Sinusse der Winkel gleich dem umgekehrten Verhältnis der Brechzahlen.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3.2)$$

Ein alltägliches Beispiel für den Effekt der Brechung ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Ein Löffel ist in einem Glas platziert, das mit Wasser und Olivenöl gefüllt ist. Das Wasser und das Olivenöl bilden durch den Dichtenunterschied zwei räumlich getrennte Phasen. Der Löffel scheint an jeder Grenze zwischen zwei Medien gebrochen zu sein. Der Grund dafür ist, wie oben beschrieben, der Brechzahlunterschied der drei Medien:

- Luft  $n_{Luft} = 1,00$  [139]
- Olivenöl  $n_{Öl} = 1,47$  [98]

<sup>4</sup>Vereinfachte Darstellung. In der Realität ist die Brechzahl eine Funktion der Wellenlänge  $n_i = \frac{c_0(\lambda)}{c_i(\lambda)}$  [10].

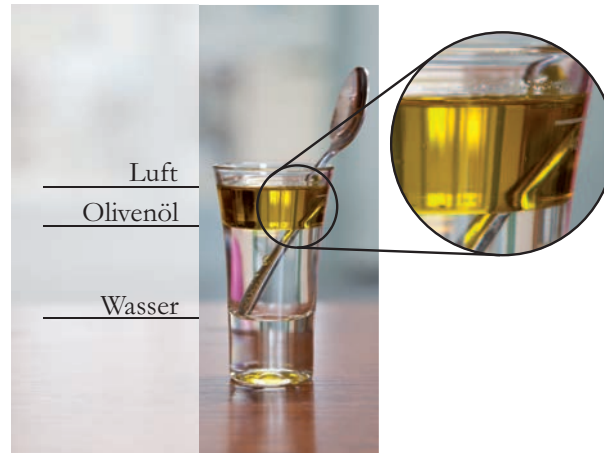


Abbildung 3.10.: Brechung am Beispiel eines Löffels im Glas mit Wasser und Olivenöl.

- Wasser  $n_{\text{Wasser}} = 1,33$  [139]

Auf dem Phänomen der Lichtbrechung basiert das Prinzip der Schattenabbildung, das im Folgenden beschrieben wird.

#### 3.3.2. Grundlagen der Schattenabbildung

Schattenabbildung (*engl.* Shadowgraphy) ist eine bekannte Methode und gehört zu den Schlierenverfahren [125]. Die ersten Quellen zur Schattenabbildung stammen aus dem 18. Jahrhundert vom französischen Revolutionär Jean Paul Marat [22], später führten DVORÁK und SCHARDIN die Untersuchungen weiter [29, 117]. Der Methode liegt die Brechung von Lichtstrahlen an den Übergängen aus einem Medium in das andere zu Grunde.

Das Funktionsprinzip der Schattenabbildung kann mit folgendem Beispiel erklärt werden. Abbildung 3.11 links zeigt eine ideal homogene transparente Schicht mit Brechzahl  $n_S$ . Das aus der Luft ( $n_L$ ) einfallende Licht wird zum Lot gebrochen, weil  $n_S$  größer  $n_L$  ist. Beim Austritt aus der Schicht wird das Licht nochmals gebrochen, diesmal vom Lot. Somit verursacht solch eine ideale Schicht eine parallele Verschiebung des Lichts. Eine Schicht mit diesem Verhalten wird in der Optik als planparallele Platte bezeichnet [75]. Der Schirm unten wird gleichmäßig beleuchtet.

Im Falle einer inhomogenen Schicht (Abb.3.11 rechts), die durch Schichtdickenunterschiede gezeichnet ist, werden die einfallenden Lichtstrahlen nicht mehr parallel verschoben bedingt durch die Krümmungen der Oberfläche. Diese Krümmungen können in erster Näherung als konvexe oder konkave Linsen betrachtet werden. Da die Lichtstrahlen nicht mehr parallel austreten, entstehen auf dem Schirm unterschiedlich beleuchtete Bereiche. Das bedeutet: Die Inhomogenitäten werfen Schatten.

Dieses Verfahren etablierte sich zur Untersuchung hochtransparenter Medien, die sonst nur schwierig messtechnisch erfasst werden können. Diese Methode wird oft bei der Folien- und Glasherstellung eingesetzt, um die Schichtqualität zu kontrollieren und zu steuern. Die mit Schattenabbildung detektierbaren Inhomogenitäten können dabei nicht nur auf Schichtdickenunterschiede zurückgeführt werden. Häufig werden Schattenabbildung und Schlierenmethoden in den Bereichen Strömungsdynamik, Ballistik,

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

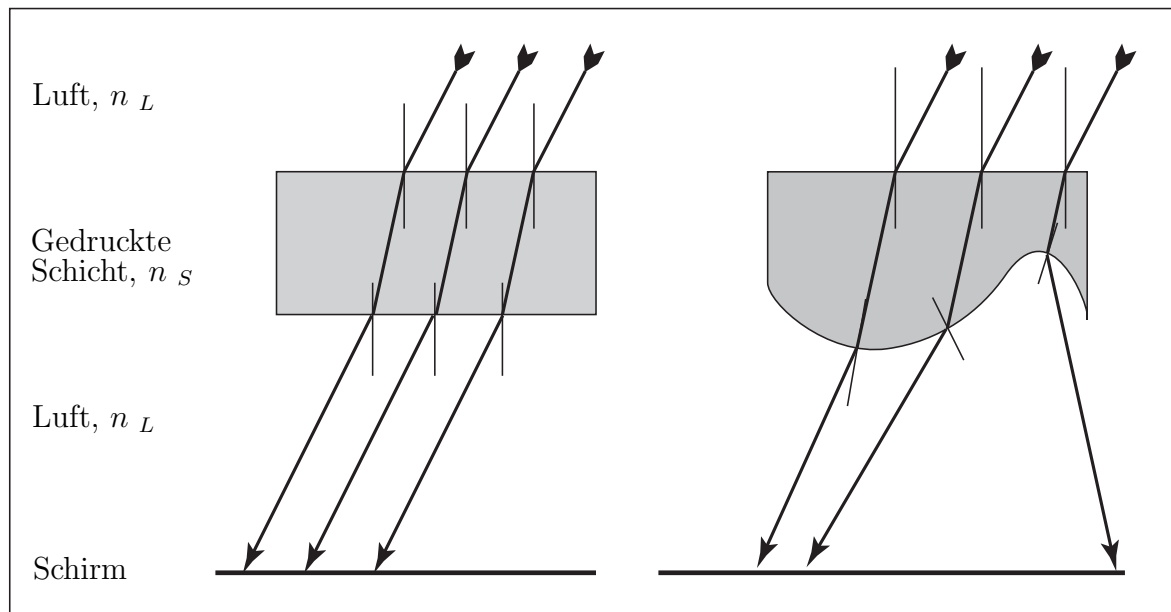


Abbildung 3.11.: Detektierung der Schichtinhomogenität anhand Schattenabbildung. Eine ideal homogene Schicht (links) verursacht eine parallele Verschiebung der einfallenden Lichtstrahlen bedingt durch das Verhältnis der Brechzahlen  $n_S > n_L$ . Der Schirm wird dabei gleichmäßig beleuchtet. In einer inhomogenen Schicht (rechts) müssen die gebrochenen Lichtstrahlen unterschiedliche Distanzen innerhalb der Schicht überwinden. Die Brechung in das optisch dünnere Medium Luft passiert nun vom Lot. Die ausfallenden Strahlen werden wegen der Oberflächenkrümmung nicht mehr parallel gebrochen. Das verursacht die Schattenbildung auf dem Schirm.

Wärme- und Stoffübertragung angewendet [94, 102]. Dabei können die durch mechanische und thermische Wirkung entstehenden Dichteunterschiede im Fluid (Flüssigkeit, Gas) als Inhomogenitäten betrachtet werden. Es entsteht eine ungleichmäßig beleuchtete Abbildung auf dem Schirm, die Schatten deuten auf die Inhomogenitäten im Medium hin. Beispiele für den Einsatz der Schattenabbildungen sind Abbildung 3.12 zu entnehmen.

Ein Schattenabbildungsprüfstand besteht im einfachsten Fall aus drei Komponenten: Punktuelle Lichtquelle, transparente Probe und eine für die Projektion der Schattenabbildung geeignete Oberfläche. Eine *punktuelle* oder *punktförmige* Quelle emittiert das Licht radial gleichmäßig in alle Richtungen, d.h. die Lichtstrahlen divergieren [27]. Die Größe einer punktuellen Lichtquelle kann vernachlässigt werden. Ihre Verwendung ist für die Entstehung scharfer Schatten wichtig [73]. Der genannte Aufbau wird als direkte Schattenabbildung (*engl.* direct shadowgraphy) bezeichnet [125] und ist in Abbildung 3.13 schematisch dargestellt.

Die Wahl einer optimalen Lichtquelle zur Realisierung der punktuellen Lichtquelle ist von großer Bedeutung für ein Schattenabbildungssystem. Dabei stellt sich zum einen die Frage der Kohärenz des Lichts. SETTLES [125] schreibt, dass räumlich kohärentes Licht eine positive Auswirkung auf die Abbildungsschärfe hat. Demnach wäre ein Laser mit kohärentem Licht die beste Lösung. Allerdings stellte WILLERT ET. AL. [159] fest, dass sehr stark kohärentes Licht das System anfällig gegen Artefakte wie die

### 3.3. Optische Messmethode auf Basis der Schattenabbildung

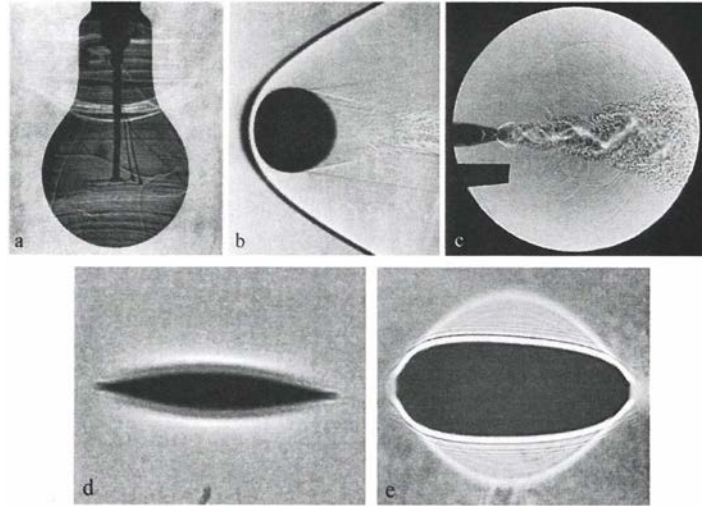


Abbildung 3.12.: Beispiele für Schattenabbildungen [125]. a) Schattenabbildung einer Glühbirne aus Glas. b) Schattenabbildung einer ballistischen Kugel, die dunkle Kurve zeigt den Umriss der Druckwelle. c) Schattenabbildung eines oszillierenden Luftstrahls. Schattenabbildung eines großen d) und eines kleinen c) Lufteingusses in antiken Fenstergläsern. (Bildwiedergabe mit freundlicher Erlaubnis von Springer Science+Business Media / With kind permission of Springer Science+Business Media.)

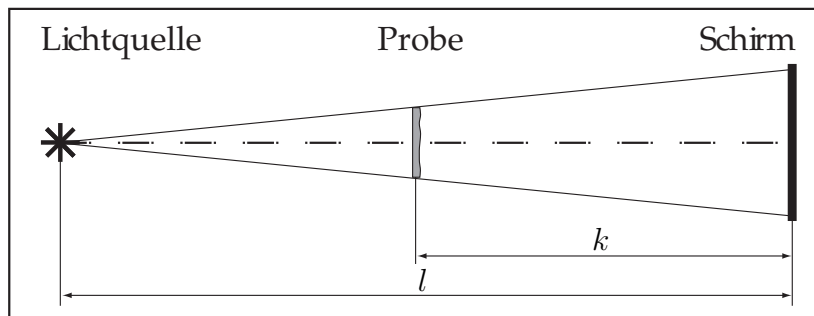


Abbildung 3.13.: Schematische Darstellung der direkten Schattenabbildung. Es werden drei Komponenten benötigt: Lichtquelle, das zu charakterisierende Objekt bzw. Probe und ein Schirm.  $k$  ist der Abstand zwischen der Probe und dem Schirm.  $l$  ist der Abstand zwischen der Lichtquelle und dem Schirm.

sogenannten „speckles“<sup>5</sup> macht. Es ist also ein Kompromiss zwischen Kohärenz und Inkohärenz zu finden. An dieser Stelle können Leuchtdioden (kurz LED von *engl.* light-emitting diode) eine passende Lösung sein, da ihr Kohärenzverhalten viel besser als das anderer Lichtquellen ist. Ein zusätzlicher Vorteil von LEDs ist die Abwesenheit der sogenannten Warm-up-Phase<sup>6</sup>, die für andere Leuchtstoffe und Lichtquellen typisch ist. Darunter wird die Zeit verstanden, die zwischen dem Einschalten der Lichtquelle und der Erreichung ihrer maximalen Lichtstärke vergeht. Je nach Leuchtstoff kann diese Zeit bis zu einer Stunde betragen [150]. Die LEDs erreichen hingegen ihre maximale Lichtstärke innerhalb weniger Millisekunden und sind somit sofort einsatzbereit [31].

Die nächste wichtige Frage bei der Auswahl der Lichtquelle sind die spektralen Cha-

<sup>5</sup> *engl.* für Flecken, Sprenkel, Tupfen.

<sup>6</sup> *engl.* Aufwärmphase

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

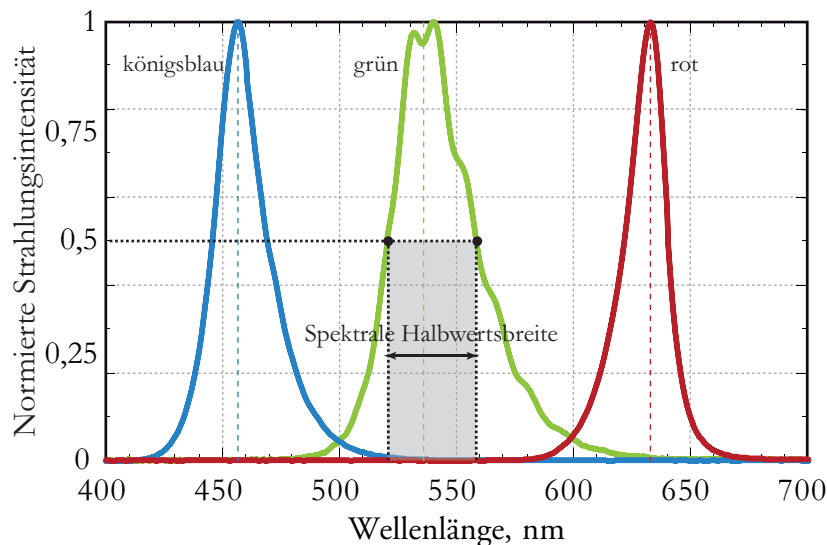


Abbildung 3.14.: Normierte von HAPPEL gemessene Spektren dreier LEDs LUXEON Star königsblau, grün, rot. Die Spektren haben stark ausgeprägte Peaks und kleine Halbwertsbreiten. (Daten- und Bildwiedergabe mit freundlicher Erlaubnis von Frau Dr.-Ing. K. Happel)

Charakteristiken. Bei Benutzung weißer Lichtquellen entsteht die Gefahr chromatischer Aberrationen. Der Grund dafür ist, dass die Brechzahlen wellenlängenabhängig sind. Zur Vermeidung der Aberrationen können monochromatische Lichtquellen eingesetzt werden. Hier bieten sich wieder LEDs an, weil deren Spektren durch starke Peaks geprägt (siehe Abb. 3.14) und dadurch schmalbandig sind. Außer der typischen Wellenlänge werden sie durch spektrale Halbwertsbreite charakterisiert. Letztere wird als Differenz zwischen den Wellenlängen errechnet, an denen die Spektralwerte 50% betragen, und liegen bei LEDs bei 20 – 30 nm. Die aufgelisteten Argumente sprechen für den Einsatz von LEDs als punktuelle Lichtquelle für Schattenabbildungssysteme. Weiterentwicklung und Untersuchung der Arbeitsparameter und -aspekte von LEDs liegen im Fokus der modernen Forschung. Mehr Informationen zur aktuellen Forschung zum Thema LED sind in Veröffentlichungen vom Fachgebiet Lichttechnik an der Technischen Universität Darmstadt und vom Lichttechnischen Institut am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu finden [41, 63, 123].

Direkte Schattenabbildung kann zur Charakterisierung transparenter Silikonschichten und Detektierung der sich darin befindenden Inhomogenitäten verwendet werden. Die physikalischen Aspekte der Methode werden in Kapitel 3.3.3 beschrieben.

#### 3.3.3. Anwendung der Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

Abbildung 3.15 zeigt schematisch die Brechung eines Lichtstrahls, dessen Verlauf vom Vektor  $\vec{s}$  dargestellt wird. Der Lichtstrahl wandert durch eine gekrümmte Probe, die aus einem Substrat und einer Silikonschicht besteht, in die Luft. In Abbildung 3.16 ist ein Querschnitt der Grenzfläche Probe-Luft und der Lichtbrechung abgebildet. Das Licht wird von einer divergenten punktuellen Lichtquelle emittiert. Wie in Kapitel 3.2 erwähnt, ist der Brechzahlenunterschied des Silikons und des Substrats sehr gering

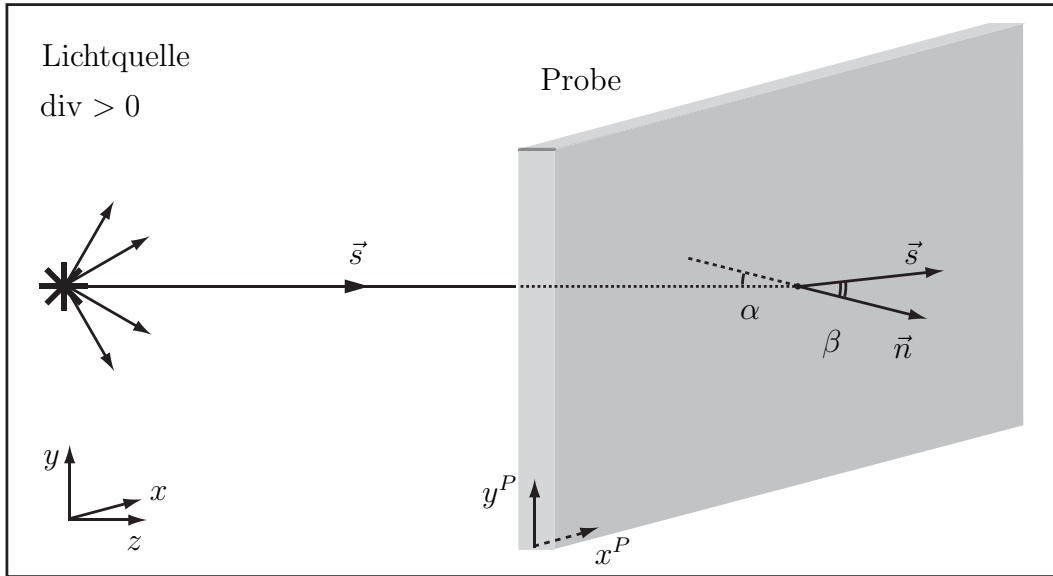


Abbildung 3.15.: Schematische dreidimensionale Darstellung der Lichtbrechung an der Grenze zwischen Probe (Silikonschicht, Brechzahl  $n_s$ ) und Luft (weiß, Brechzahl  $n_L$ ). Die Brechung an der Grenze Luft-Probe beim Eintreten des Lichtstrahls  $\vec{s}$  ist nicht abgebildet.  $\vec{n}$  - Lot zur Oberfläche,  $(x^P, y^P)$  - Koordinaten der Probe,  $h(x^P, y^P)$  - variierende Schichtdicke,  $\alpha$ - Einfallswinkel,  $\beta$ - Ausfallswinkel, divergente Punktlichtquelle.

(s. Tabelle 3.1 auf S. 55) und kann vernachlässigt werden. Es kann also angenommen werden, dass die Probe die Brechzahl der Silikonschicht  $n_s$  besitzt<sup>7</sup>. Die Brechzahl des Silikons  $n_s$  ist größer als die der Umgebungsluft  $n_L$ . Demnach wird der Strahl  $\vec{s}$  weg vom Lot  $\vec{n}$  gebrochen.

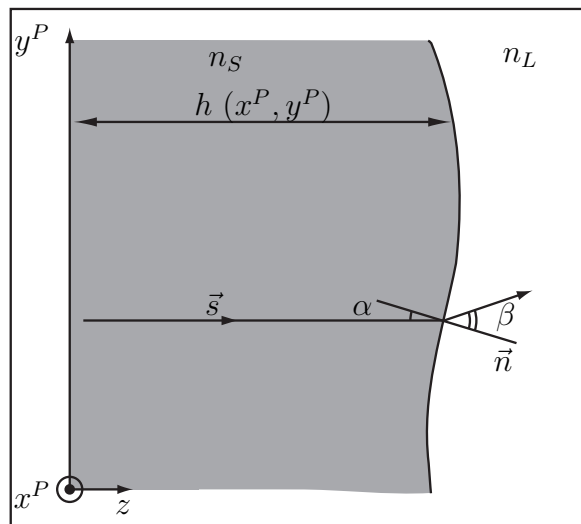


Abbildung 3.16.: Schematische Darstellung der Lichtbrechung an der Grenze zwischen Probe (Silikonschicht, Brechzahl  $n_s$ ) und Luft (weiß, Brechzahl  $n_L$ ).  $\vec{s}$  - Lichtstrahl,  $\vec{n}$  - Lot zur Oberfläche,  $(x^P, y^P)$  - Koordinaten der Probe,  $h(x^P, y^P)$  - variierende Schichtdicke,  $\alpha$ - Einfallswinkel,  $\beta$ - Ausfallswinkel.

<sup>7</sup>Im Falle einer Probe ohne Substrat muss diese Annahme nicht getroffen werden. Die Probe besitzt dann ebenso die Brechzahl  $n_s$ .

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

Für die nachfolgende Modellierung wird angenommen, dass die geometrische Anordnung und die Eigenschaften der optischen Komponenten Kaustiken, also Bündelung der Lichtstrahlen, ausschließen. Das heißt, dass die Strahlen, die von der divergenten Lichtquelle ausgehen, sich nach der Brechung in der Schicht nicht überkreuzen. Dies kann angenommen werden, wenn die Krümmungen der Silikonoberfläche und der Abstand zwischen der Probe und dem Schirm vergleichsweise klein sind und die Lichtquelle punktuell ist. Bei einem zu großen Abstand zwischen Schirm und Probe würde die Brechung selbst an einer leicht gekrümmten Oberfläche zu Strahlenüberlagerung führen. Dies wird hier ausgeschlossen. Es kann also angenommen werden, dass die Einfallswinkel  $\alpha$  und  $\beta \ll 1$  rad sind. Diese Aspekte werden bei der nachkommenenden Versuchsdurchführung berücksichtigt. Unter diesen Bedingungen gilt, dass jedem Punkt  $i$  an der Oberfläche der Probe mit Raumkoordinaten  $(x_i^P, y_i^P)$  ein Punkt auf der Schattenabbildung  $(x_i^S, y_i^S)$  entspricht, wobei

$$(x_i^P, y_i^P) = (x_i^S, y_i^S) \cdot \kappa \quad (3.3)$$

$\kappa$  ist ein Proportionalitätsfaktor, der sich aus den einfachen geometrischen Zusammenhängen (Abb. 3.13 auf S. 59) folgendermaßen berechnen lässt, wobei  $k$  und  $l$  jeweils die Abstände zwischen dem Schirm und der Probe und dem Schirm und der Lichtquelle sind [125]:

$$\kappa = l/(l - k) \quad (3.4)$$

Das Snelliussche Brechungsgesetz lautet hierfür wie folgt ( $\alpha$  Einfallswinkel,  $\beta$  Ausfallswinkel):

$$n_L \cdot \sin \beta = n_S \cdot \sin \alpha \quad (3.5)$$

Aus der Annahme  $\alpha$  und  $\beta \ll 1$  folgt, dass  $\sin \alpha \approx \alpha$ , ebenso gilt für  $\sin \beta \approx \beta$ . Daher kann Gleichung 3.5 wie folgt umgeschrieben werden:

$$n_L \cdot \beta = n_S \cdot \alpha \quad | \quad - n_L \cdot \alpha \quad (3.6)$$

$$n_L \cdot (\beta - \alpha) = \alpha \cdot (n_S - n_L) \quad (3.7)$$

Brechzahl der Luft  $n_L \approx 1$ :

$$(n_S - 1) \cdot \alpha = \beta - \alpha \quad (3.8)$$

Gleichung 3.8 beschreibt die Zusammenhänge in der Brechungsebene, die von  $\vec{s}$  und  $\vec{n}$  aufgespannt wird. Eine Silikonprobe breitet sich in der senkrecht dazu verlaufenden  $(x^P, y^P)$ -Ebene aus (s. Abb. 3.15). Für die Überführung des Problems in Vektorform wird ein Einheitsvektor  $\vec{e}_b$  definiert:

$$\vec{e}_b = \frac{(\vec{n} \times \vec{s}) \times \vec{n}}{|(\vec{n} \times \vec{s}) \times \vec{n}|} \quad (3.9)$$



Gleichung 3.8 kann wie folgt umgeschrieben werden:

$$(n_S - 1)\alpha \cdot \vec{e}_b = (\beta - \alpha)\vec{e}_b \quad (3.10)$$

Da  $\alpha \ll 1$  rad ist, gilt  $\alpha \approx \tan \alpha$ .  $\xi$  sei die Differenz zwischen  $\alpha$  und  $\beta$ :  $\xi = |\alpha - \beta|$ . Dann gilt:

$$(n_S - 1) \tan \alpha \cdot \vec{e}_b = \xi \vec{e}_b \equiv \vec{\xi} \quad (3.11)$$

$\tan \alpha \cdot \vec{e}_b = \vec{\nabla} h(x^P, y^P)$  per Definition, wobei  $h(x^P, y^P)$  die Schichtdicke der Probe am Punkt  $i$  ist, dann gilt für Gleichung 3.11:

$$\boxed{(n_S - 1) \cdot \vec{\nabla} h(x^P, y^P) = \vec{\xi}} \quad (3.12)$$

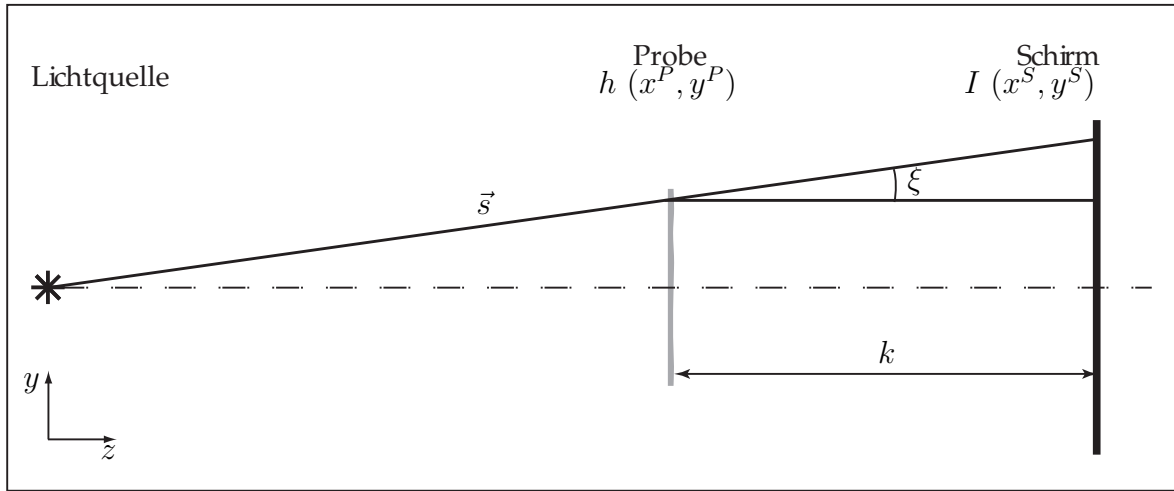


Abbildung 3.17.: Schematische Darstellung eines Lichtstrahls  $\vec{s}$ , der von der Lichtquelle zum Schirm wandert und dabei durch die Silikonschicht der Probe mit Dicke  $h(x^P, y^P)$  gebrochen wird. Die Dicke der Probe ist übertrieben dargestellt.  $\xi$ - ist die Differenz zwischen Einfallswinkel  $\alpha$  und Ausfallswinkel  $\beta$  (s.Abb. 3.16),  $k$  ist der Abstand zwischen der Probe und dem Schirm.  $I$  ist die messbare Lichtintensität am Schirm, die der Dicke  $h(x^P, y^P)$  entspricht.

Abbildung 3.17 zeigt vergrößert den Strahlverlauf aus Abbildung 3.16. Da die Probe eine Transparenz von fast 100% aufweist (s. Kapitel 3.2), kann angenommen werden, dass die Abschwächung der Lichtintensität  $I$  nur durch die Brechung an den Schichtinhomogenitäten und durch die Divergenz der Lichtquelle verursacht wird. Aus den geometrischen Annahmen am Kapitelanfang folgt, dass die Intensitätsänderung gering ist:  $|\frac{\delta I}{I}| \ll 1$ . Der Einfluss der Divergenz der Lichtquelle auf die Lichtintensität hängt vom Abstand Probe-Schirm  $k$  ab:

$$\boxed{\delta I(x^S, y^S) = -k \cdot \text{div } \vec{\xi}} \quad (3.13)$$

Durch Ersetzen von  $\vec{\xi}$  durch den linken Teil der Gleichung 3.12 folgt ( $\text{div} = \vec{\nabla}$ ):

### 3. Optische Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten

$$\delta I(x^S, y^S) = -k \cdot \vec{\nabla}(\vec{\nabla} h(x^P, y^P) \cdot (n_S - 1)) \quad (3.14)$$

$$\delta I(x^S, y^S) = -k \cdot \nabla^2 h(x^P, y^P) \cdot (n_S - 1) \quad (3.15)$$

$$\underbrace{\nabla^2 h(x^P, y^P)}_{\substack{\text{Krümmung} \\ \text{der Oberfläche} \\ \text{der Probe}}} = \underbrace{\frac{1}{k(1 - n_S)}}_{\text{const.}} \cdot \underbrace{\delta I(x^S, y^S)}_{\substack{\text{Änderung} \\ \text{der Lichtintensität} \\ \text{am Schirm}}} \quad (3.16)$$

Formel 3.16 zeigt, dass die Krümmung<sup>8</sup>  $\nabla^2$  der Oberfläche der Probe aus der Änderung der Lichtintensität  $\delta I(x^S, y^S)$  am Schirm berechnet werden kann. Der erste Term der rechten Seite der Gleichung bleibt bei gegebenen Bedingungen konstant. Somit kann es anhand Lichtintensitätsmessung auf die Krümmung der Probenoberfläche geschlossen werden. Eine absolute Schichtdickenmessung oder Ermittlung des genauen Profils der Oberfläche ist hier ohne Weiteres nicht möglich. Die gewonnenen Informationen über die Krümmung können allerdings zur Bestimmung der Schichthomogenität benutzt werden.

Nach der Klärung der theoretischen Aspekte der Methode, kann diese in die Praxis umgesetzt werden. Der erste Schritt hierbei ist eine Machbarkeitsstudie, die im kommenden Kapitel dargestellt wird.

---

<sup>8</sup> $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  (Gaußsche) Krümmung der Schichtoberfläche.

## 4. Machbarkeitsstudie zur Methode der Schattenabbildung

Im Kapitel 3 wurden die theoretischen Aspekte der Methode der Schattenabbildung dargestellt. In diesem Kapitel folgt eine Machbarkeitsstudie mit dem Ziel, mit bereits vorhandenen Mitteln die Theorie zu überprüfen und eventuelle Schwachstellen herauszufinden. Für diesen Zweck wurde ein relativ einfacher Versuchsaufbau konzipiert. Nach der Auswertung der Ergebnisse wird das Konzept kritisch hinterfragt, die entstandenen Mängel und Fehler werden analysiert.

### 4.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Der Realisierung eines Versuchsaufbaus wurde die sogenannte *direkte Schattenabbildung* zugrunde gelegt. In diesem Fall beinhaltet dieser eine Lichtquelle, eine Probe und einen Schirm (s. Kapitel 3.3.2).

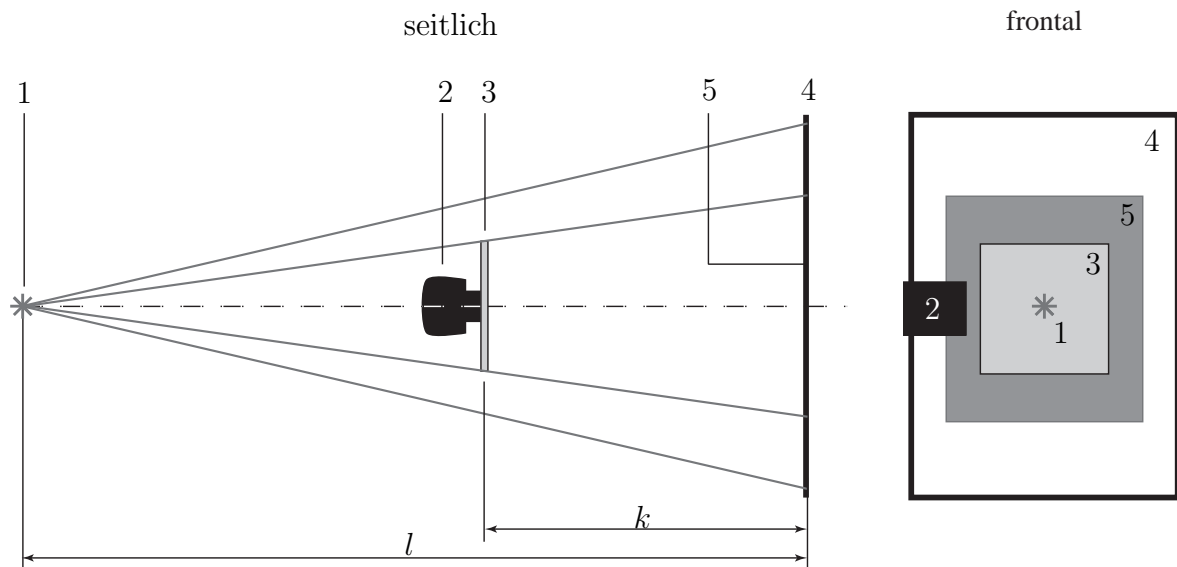


Abbildung 4.1.: Versuchsaufbau für die Machbarkeitsstudie. Dieser besteht aus einer Lichtquelle (blaue LED von LUXEON) 1, Digitalkamera CANON 450D 2, Probe 3 und Schirm 4. Passieren die Lichtstrahlen die Probe, so entsteht eine sichtbare Schattenabbildung 5 am Schirm. Die Entfernung zwischen Lichtquelle und Schirm  $l = 2$  m, die Entfernung zwischen Probe und Schirm  $k = 1$  m.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Als Lichtquelle wurde eine LED LUXEON STAR in der Farbe königsblau benutzt (technische Daten sind dem Anhang D.1 zu entnehmen). Bereits 2002 waren LEDs die am häufigsten ein-

#### 4. Machbarkeitsstudie zur Methode der Schattenabbildung

gesetzte Lichtquelle für diverse industrielle Bildverarbeitungsanwendungen [23]. DEMANT ET AL. erklären dies mit der damit verbundenen Flexibilität in der geometrischen Anordnung und Ansteuerung, Energiesparsamkeit und langer Lebensdauer der LEDs [23]. LEDs eignen sich sehr gut für die Nutzung als punktuelle Lichtquellen, da sie sehr klein sind (der Durchmesser von LUXEON STAR liegt bei ca. 5 mm). So kann das optische System relativ klein gehalten werden und dennoch die Annahme einer punktuellen Lichtquelle rechtfertigen. Die LED besitzt einen passiven Kühlkörper und wurde für eine besser gerichtete Strahlung zusätzlich mit schwarzer Pappe seitlich ausgekleidet.

Die jeweilige rechteckige Probe (Silikonschicht meistens aufgetragen auf ein Hostaphan-Substrat) wurde in einer Probenhalterung an ihrer oberen Kante aufgehängt. Ein weiß beschichtetes Plexiglas angebracht an eine Wand diente als Schirm. Sämtliche Experimente wurden in einem Raum mit schwarz gestrichenen Wänden, Decke und Boden durchgeführt, um Lichtstreuung zu vermeiden. Die LED war die einzige Lichtquelle im Raum.

Eine entscheidende Rolle für den Abbildungskontrast des Schattenabbildungssystems spielen die Abstände zwischen der Lichtquelle und dem Schirm  $l$  und zwischen der Probe und dem Schirm  $k$ . Laut SCHARDIN wird der optimale Kontrast erreicht, wenn der Abstand Lichtquelle-Schirm  $l$  maximal ist und das Verhältnis  $k/l$  0,5 beträgt [117, 125]. Demnach wurden der Abstand Lichtquelle-Schirm von 2 m und der Abstand Probe-Schirm von 1 m festgelegt.

Zur Aufnahme der am Schirm entstehenden Schattenabbildungen wurde eine kommerziell erhältliche digitale Spiegelreflexkamera CANON EOS 450D verwendet. Relevante technische Daten sind im Anhang D.2 zu finden. Für die Aufnahmen wurde das Kitobjektiv CANON EF-S 18-55 benutzt. Die Kamera wurde seitlich von der optischen Achse so platziert, dass die äußerste Objektivlinse ungefähr in einer Ebene mit der Probe war. Die Aufnahmeparameter sind in Tabelle 4.1 festgehalten. Ein kurzer Exkurs zum Thema „Grundlegende Kameraeinstellungen“ ist im Anhang A gegeben.

Tabelle 4.1.: Kameraeinstellungen für die Machbarkeitsstudie

Blendenzahl	5,6
Belichtungszeit	2 s
ISO-Wert	400

Die benutzte Spiegelreflexkamera zeichnet sich durch ein starkes Rauschen bei hohen ISO-Werten aus, daher wurde der relativ niedrige ISO-Wert von 400 gewählt, um die Ergebnisse dadurch nicht zu verfälschen. Da der Umgebungsraum komplett schwarz und die LED die einzige Lichtquelle war, wäre der Lichtmangel bei dem gewählten ISO-Wert durch eine weit offene Blende oder eine lange Belichtungszeit zu kompensieren gewesen. Eine weit offene Blende (niedrige Blendenzahl) führt zu einer nicht ausreichenden Schärfentiefe. Es wurde daher die Blendenöffnung von 5,6 gewählt, die als Kompromiss zwischen einer ausreichend scharfen Abbildung und der Minimierung der Belichtungszeit bis auf zwei Sekunden diente.

## 4.2. Probenauswahl

Für die Machbarkeitsstudie wurde eine begrenzte Probenanzahl ausgewählt. Alle Proben wurden aus zweikomponentigem Silikon Elastosil P7670 der Firma WACKER CHEMIE in vier Herstellungsverfahren produziert: Filmziehen, Siebdruck, Spin-Coating und Gießen. Gießen gehört nicht zu den Druck- oder Beschichtungsverfahren und wurde kurz in Kapitel 2.2.1 angesprochen. Dennoch wurde Gießen für die Machbarkeitsstudie herangezogen, da dieses Verfahren typisch für die industrielle Siliconverarbeitung und in seiner einfachsten Form sehr leicht in Laborbedingungen zu realisieren ist. Für die Machbarkeitsstudie wurde eine viereckige etwa DIN A5 große und 1 mm tiefe Metallform (s. Abb. 4.2) mit Silikon befüllt, die Silikonvernetzung wurde thermisch in einem Ofen beschleunigt.

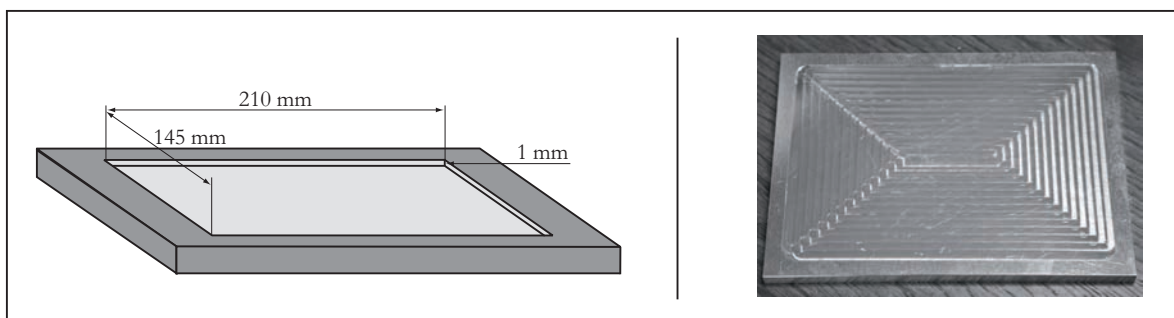


Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung und Foto benutzter Gussform.

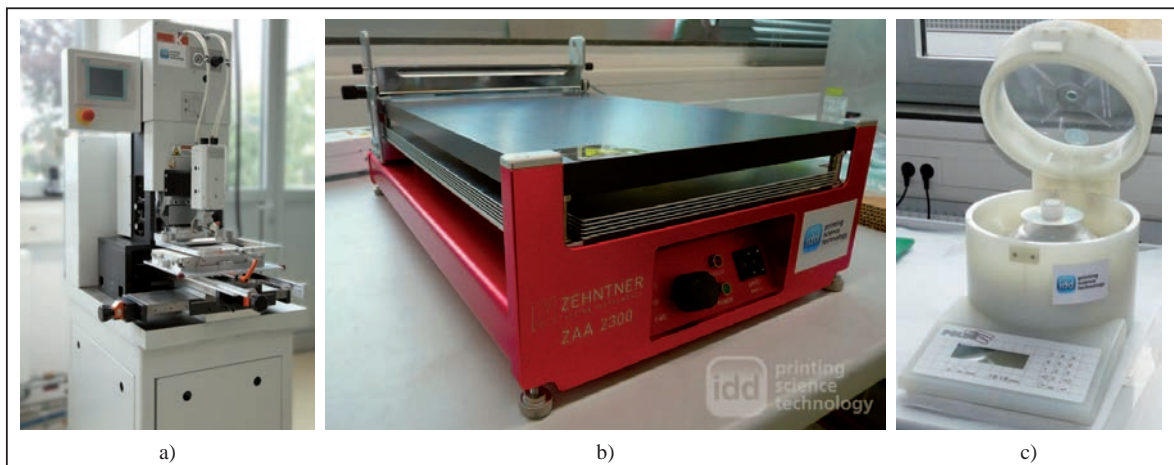


Abbildung 4.3.: Druck- und Beschichtungsgeräte zur Machbarkeitsstudie. a) Laborsiebdruckmaschine KAMMANN K15Q SL. b) Filmziehgerät ZEHNTNER ZAA2300. c) Spin-Coater SPS-Europe POLOS MCD200-NPP [58].

Je nach Herstellungsverfahren wurden unterschiedliche Substrate beschichtet. Dieses wird durch das Verfahren und/oder das Gerät bestimmt. Im Fall von Filmziehen und Siebdruck wurde das Silikon auf PET-Folien (Hostaphan) in Größe ca. DIN A5 aufgetragen. Der Siebdruck erfolgte auf der Laborsiebdruckmaschine KAMMANN K15Q SL (Abb. 4.3 a)). Diese wurde im Jahre 2011 gemeinsam vom Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren und Firma KAMMANN für Anwendungen im funktionalen Druck entwickelt [40]. Die Filmziehproben wurden auf gleichen Substraten auf dem

#### 4. Machbarkeitsstudie zur Methode der Schattenabbildung

ZEHNTNER Filmziehgerät ZAA2300 mit einem ZEHNTNER ZUA2000 Universalapplikator hergestellt (Abb. 4.3 b)).

Für die Probenherstellung mittels Spin-Coating wurde der manuelle Spincoater SPS-Europe POLOS MCD200-NPP verwendet (Abb. 4.3 c)). Als Substrat dienten 5x5 cm große Laborgläser. Alle Substrate wurden vor dem Schichtauftrag mit Isopropanol vorgereinigt. Beide Silikonkomponenten A und B wurden, wie im Unterkapitel 2.2.2 beschrieben, vor dem Gebrauch in einem Exsikkator entgast und im Anschluss anhand einer Handpistole vermischt und dann in jeweiligen Verfahren aufgebracht. Unmittelbar nach dem Auftrag der Schichten wurden diese thermisch behandelt, um die Vernetzung der Komponenten zu beschleunigen. Dies geschah im Falle des Filmziehens anhand eines Infrarotstrahlers der Firma ELSTEIN, nach dem Siebdruck in einem Umlufttrockner von Firma VÖTSCH oder im Falle des Spin-Coatings auf einer Laborheizplatte. Die Verwendung unterschiedlicher Heizarten war durch die jeweilige räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Geräte bedingt. Genaue Angaben zu den Herstellungsprozessen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Die Herstellung der gegossenen Proben erfolgte extern am Institut für Elektromechanische Konstruktionen EMK der Technischen Universität Darmstadt. Die vermischten Silikonkomponenten wurden in eine flache Gießform aus Aluminium gegeben. Die befüllte Gießform wurde in einem Ofen bei 80°C 30 Minuten lang thermisch behandelt. Eine so lange Behandlungszeit war in diesem Fall durch die relativ große Materialmenge bedingt (ca. 30 ml). Bei den beschichteten und bedruckten Proben handelt es sich um Schichten von mehreren zehn Mikrometern, wobei die gegossene Schicht im Millimeterbereich liegt. Für die Machbarkeitsstudie wurden drei Proben je Herstellungsverfahren produziert, mit der Ausnahme der Gießprobe, die nur einzeln vorlag.

Tabelle 4.2.: Daten zur Fertigung der Proben aus WACKER Elastosil P7670 für die Machbarkeitsstudie. Für alle Verfahren bis auf Gießen werden ca. 5 ml Silikon à Probe benötigt, für das Gießen ca. 30 ml. Die gegossene Probe wurde extern am Institut für Elektromechanische Konstruktionen EMK der Technischen Universität Darmstadt gefertigt. Technische Daten zu den Gerätschaften sind dem Anhang D zu entnehmen.

	Substrat	Größe, cm <sup>2</sup>	Thermische Behandlung		
			Temperatur, °C	Dauer, min.	Art
Filmziehen	PET	14,8×21,0	110	3	IR-Strahler
Siebdruck	PET	14,8×21,0	110	3	Ofen
Spin-Coating	Glas	5,0×5,0	130	2	Heizplatte
Gießen	–	14,5×21,0	80	30	Ofen
Prozessparameter					
Filmziehen	Geschwindigkeit 50 mm/s, Rakelhöhe: 175µm = 125µm (Substratdicke) + 50µm (Schicht)				
Siebdruck	Geschwindigkeit 0,25 m/s, Rakeldruck 3 bar Rakelwinkel 75°, Rakel 85 Shore A, Absprung 3 mm, Sieb 77-48				
Spin-Coating	Stufe 1: Dauer 30 s, Geschwindigkeit 200 $\frac{U}{min}$ , Beschleunigung 500 $\frac{U}{min \cdot s}$ Stufe 2: Dauer 60 s, Geschwindigkeit 500 $\frac{U}{min}$ , Beschleunigung 500 $\frac{U}{min \cdot s}$				

### 4.3. Ergebnisse und Diskussion

Als erste Ergebnisse<sup>1</sup> liegen die Aufnahmen der Schattenabbildungen der oben beschriebenen Proben vor, die als Dateien im Format CR2, der CANON-Version vom Format RAW<sup>2</sup> vorliegen. Diese müssen für die Auswertung vorbereitet werden. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde eine visuelle Beurteilung der Schattenabbildungen durchgeführt.

Die Kameraaufnahmen beinhalteten nicht ausschließlich die Schattenabbildungen der Proben, sondern auch einen Teil der Umgebung. Die irrelevanten Informationen wurden abgeschnitten, damit die Schattenabbildungen die komplette Bildfläche ausfüllen (vgl. Abbildung 4.4). Dies wurde im Plugin „Camera Raw“ (Version 6.6) des Adobe Photoshop (Version CS5.1) manuell vorgenommen. Die resultierenden Ausschnitte wurden als Dateien im TIFF-Format ohne Komprimierung abgespeichert.

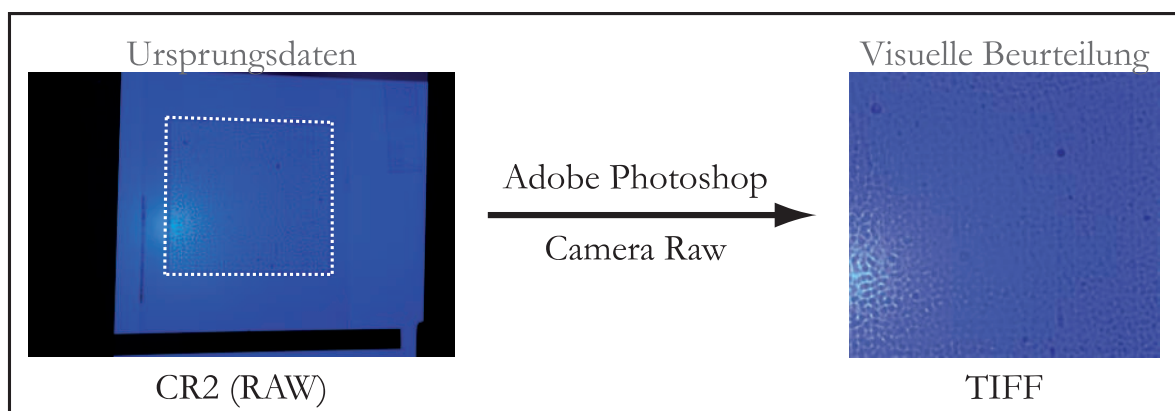


Abbildung 4.4.: Vorbereitung der Schattenabbildungen für eine visuelle Auswertung. Die ursprüngliche Aufnahme der Schattenabbildung liegt im CR2-Format (RAW) vor. Der Ausschnitt (weiße Konturlinie) wird in Camera Raw des Adobe Photoshop in eine TIFF-Datei umgewandelt.

Die resultierenden Schattenabbildungen der Proben sind in der Abbildung 4.5 dargestellt. Die blaue Färbung der Schattenabbildungen stammt von der blauen LED, die als Lichtquelle eingesetzt wurde. In der Abbildung 4.5 sind folgende Proben zu sehen: Proben 1 – 3 wurden im Filmziehen, 4 – 6 im Siebdruck, 7 – 9 im Spin-Coating und 10 mit Gießen hergestellt. Bei der Betrachtung der Schattenabbildungen können viele Merkmale gesichtet werden. Der Leser sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Schwerpunkt der Machbarkeitsstudie auf der optischen Methode liegt und nicht auf dem Vergleich bzw. der Wahl der Herstellungsverfahren für dünne Silikonschichten. Die gefundenen Merkmale und durchgeführten Vergleiche dienen ausschließlich zur Evaluierung der Methode.

Die Schattenabbildungen tragen viel Information in sich. Bei sämtlichen Proben ist eine Gemeinsamkeit sichtbar - die Herstellung in einer nicht staubfreien Umgebung. Darauf weisen einzelne dunkle Flecken, z.B. auf Proben 4, 5, 8, 9, hin. Zudem ist eine eindeutige Erkennung des Herstellungsverfahrens dank typischer Muster möglich. So

<sup>1</sup>Ein Teil der Ergebnisse wurden bereits in [44] veröffentlicht.

<sup>2</sup>engl. für roh. Rohdaten werden vom Kamerasensor direkt abgespeichert, ohne dass jegliche Bildkorrekturen, -kompressionen oder andere Veränderungen vorgenommen werden. RAW-Daten sind auch als "digitales Negativ" bekannt [71].

#### 4. Machbarkeitsstudie zur Methode der Schattenabbildung

ist bei den Proben 1 – 3 die Bewegungsrichtung des Universalapplikators von oben nach unten zu sehen, was auf das Filmziehen schließen lässt. Das punktförmige Muster der Proben 4 – 6 resultiert aus dem Durchdrücken des hochviskosen Silikons durch das feine Sieb und einer danach nicht vollständigen Einebenung der gedruckten Schicht. Die Proben 7 – 9 weisen typische Randeffekte auf, die beim Spin-Coating vor allem bei hochviskosen Fluiden entstehen und sich als dicke Ränder äußern. Die Muster der Probe 10 geben die durch die Herstellung bedingten Muster der Gießform wieder.

Auf den Proben 5 unten und 6 links und unten sind unvernetzte Stellen sichtbar. Vermutlich wurde in diesen Fällen keine saubere Vermischung durch die Benutzung der Handpistole gewährleistet. Auf den Proben 8 und 9 sind sternförmige Muster zu sehen. Vermutlich wurden diese durch einen zu hohen Temperaturgradienten (schnelle und aggressive Trocknung) verursacht.

Aus den Schattenabbildungen lassen sich zudem Defizite des Versuchsaufbaus herauslesen. Dazu gehören folgende Aspekte:

- Das Reflexionsverhalten des Schirms zeichnet sich durch einen starken Anteil an gerichteter Reflexion aus. Dies wird in manchen Schattenabbildungen in Form eines hellen Flecks sichtbar (s. Abb. 4.5: 1, 3, 10).
- Durch die mangelhafte Probenbefestigung nur an einer Kante konnte keine wiederholbare Parallelität der Probe und des Schirms gewährleistet werden. Dies könnte zu Verzerrungen in der Aufnahme führen.
- Die schwache und dunkle Lichtquelle erschwert die visuelle Beurteilung und führt zu sehr langen Belichtungszeiten.
- Das Aufnahmesystem in Form der veralteten CANON EOS 450D ist durch ihre hohe Rauschanfälligkeit und kleinen Sensor nicht optimal. Professionelle Nachfolgermodelle erzeugen Aufnahmen in einer höheren Auflösung und mit einem niedrigeren Rauschniveau bedingt durch größere Sensoren und bessere Elektronikbauteile. Von Bedeutung ist die Positionierung der Kamera im Versuchsaufbau. Eine ungünstige Position kann zur Verzerrung der Bildinformation führen.

Die Machbarkeitsstudie zeigte am Beispiel einiger weniger Proben, dass die Methode der Schattenabbildung grundsätzlich dafür geeignet ist, Inhomogenitäten in dünnen Silikonschichten zu detektieren und diese zu deuten. Beim benutzten Versuchsaufbau wurden einige Defizite aufgedeckt. Die dafür benötigten Lösungen fließen in die Konstruktion des finalen Prüfstands ein, der zur Charakterisierung von Silikonschichten herangezogen wird. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben.



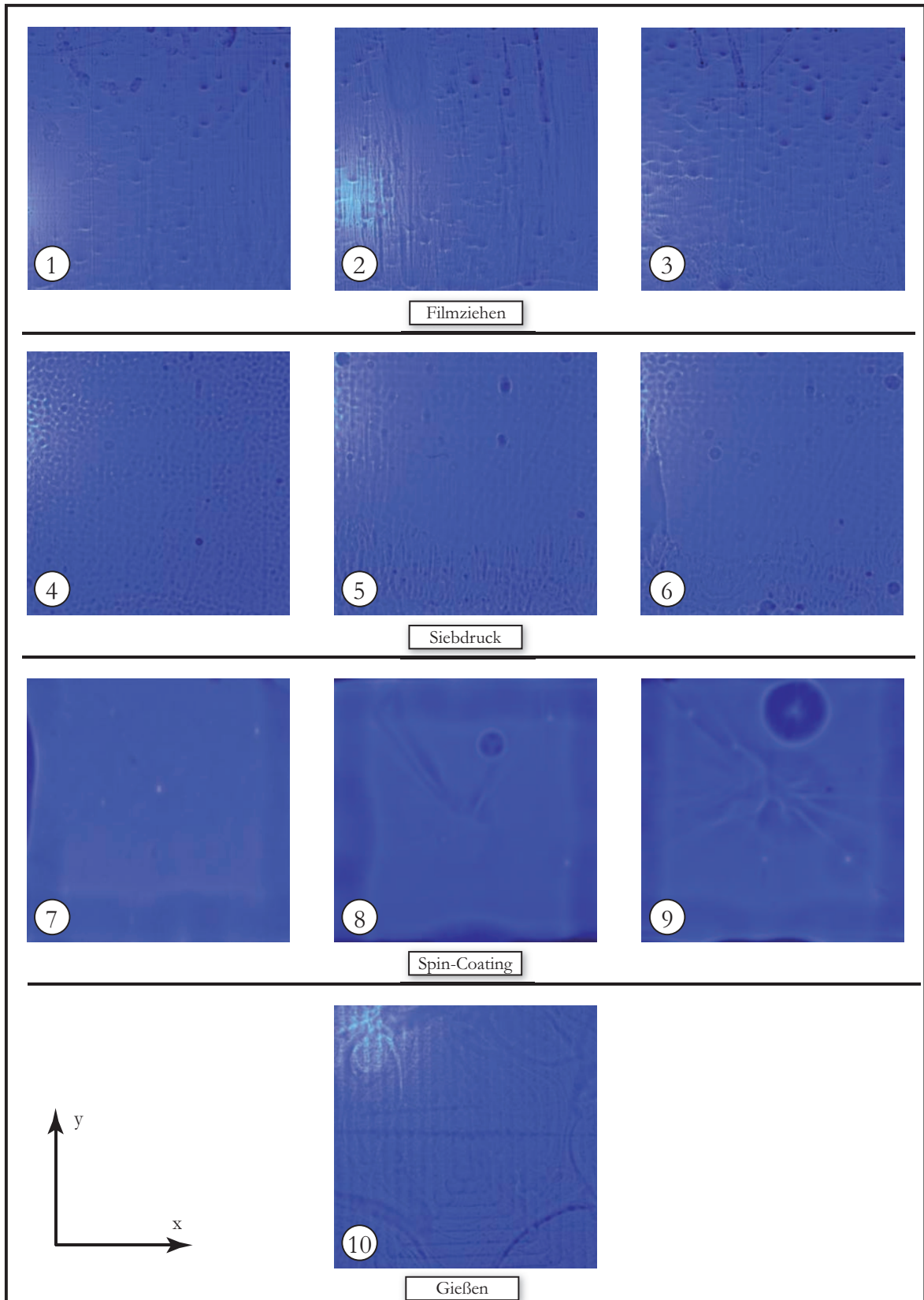


Abbildung 4.5.: Ergebnisse der Vorversuche. Schattenabbildungen der jeweiligen Proben. 1–3 Filmziehen, 4–6 Siebdruck, 7–9 Spin-Coating, 10 Gießen. x und y bezeichnen die Koordinatenrichtung in der Probenebene. Diese Ergebnisse wurden von der Autorin bereits in [44] veröffentlicht.

#### 4. *Machbarkeitsstudie zur Methode der Schattenabbildung*

## 5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung

Die vorliegende Arbeit besitzt zwei Schwerpunkte: Die Herstellung von großflächigen Silikonschichten und deren optische Charakterisierung anhand der entwickelten Methode auf Basis der Schattenabbildung. Die Versuchsdurchführung wird in zwei Schritte geteilt. Zuerst erfolgt die Herstellung der Silikonschichten. Anschließend wird der optische Teil der Charakterisierungsmethode durchgeführt. Beide Aspekte werden im Folgenden erläutert. Anschließend wird eine Auswertungsmethode vorgestellt, die einen direkten Vergleich unterschiedlicher Proben ermöglicht.

### 5.1. Herstellung der Silikonschichten

In Kapitel 2.2.4 wurden vier Silikone ausgewählt, die sich zum druck- oder beschichtungstechnischen großflächigen Auftrag eignen. Diese sind:

1. WACKER Elastosil P7670,
2. WACKER Elastosil PK 16,
3. WACKER Elastosil RT 625 und
4. NUSIL CF19-2186.

Eine theoretische Auswahl der Herstellungstechniken für Silikonschichten wurde in Kapitel 2.3 getroffen. Demnach wurden an dieser Stelle drei Verfahren zur Herstellung von großflächigen Silikonschichten herangezogen:

- a) Filmziehen auf Bogen (im Weiteren Filmziehen-flach genannt),
- b) Filmziehen, Rolle-zu-Rolle (im Weiteren Filmziehen-rund genannt) und
- c) Siebdruck.

Die Probenherstellung wird im Folgenden erläutert. Die vier vorgestellten Silikone werden in jedem der Herstellungsverfahren prozessiert. Der Silikonauftrag erfolgt in den ersten zwei Fällen a) und b) auf einzelnen Substratbogen. Hierfür standen 175  $\mu\text{m}$  dicke PET-Folien Hostaphan GN 4660 in der Größe 120×220 mm<sup>2</sup> zur Verfügung. Der Silikonauftrag im dritten Fall c) erfolgt auf eine 120 mm breite und 96  $\mu\text{m}$  dicke Substratbahn Hostaphan GN 4660.

Für das Filmziehen-flach wurde dasselbe Gerät ZAHNTNER ZAA 2032 verwendet, das in der Machbarkeitsstudie eingesetzt wurde (vgl. S. 67). Dabei wird ein Substratbogen mittels einer Klemme festgehalten. Bei dem Applikator wird die Rakelhöhe eingestellt,

## 5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung

die sich aus der Substratdicke und der gewünschten Schichtdicke zusammensetzt. Im Filmziehen-flach wurde die Geschwindigkeit (50, 100 und 150 mm/s) variiert, um später deren eventuellen Einfluss auf die Schichtqualität ermitteln zu können. Während des Auftrags des hochviskosen NUSIL CF 19-2186 traten bereits bei der niedrigen Geschwindigkeit von 50 mm/s Probleme auf: Es wurde keine vollständige Abdeckung des Substrats mit dem Silikon erreicht. Eine weitere Verringerung der Geschwindigkeit sowie eine Variation der Rakelhöhe oder eine mehrfache Wiederholung des Beschichtungsvorgangs ergaben keine Verbesserung. Die Prozessparameter der Probenherstellung mittels Filmziehen-flach sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1.: Prozessparameter für Probenherstellung mittels Filmziehen-flach.

Filmziehen-flach	
Gerät	Filmziehgerät ZEHNTNER ZAA2300
Substrat	Hostaphan GN 4660, Dicke 175 $\mu\text{m}$ , Größe 120×220 mm <sup>2</sup>
Silikone WACKER Elastosil PK 16, RT 625 und P 7660	Rakelhöhe, $\mu\text{m}$ : 225 = 175 (Substrat) + 50 (Schicht) Geschwindigkeit, mm/s: 50, 100, 150 Thermische Behandlung: IR-Strahler, 110 °C, 3 Min.
Silikon NUSIL CF 19-2186	Rakelhöhe, $\mu\text{m}$ : 200, 225, 275 (davon 175 $\mu\text{m}$ Substrat) Geschwindigkeit, mm/s: 25, 50 Thermische Behandlung: IR-Strahler, 110 °C, 3 Min.

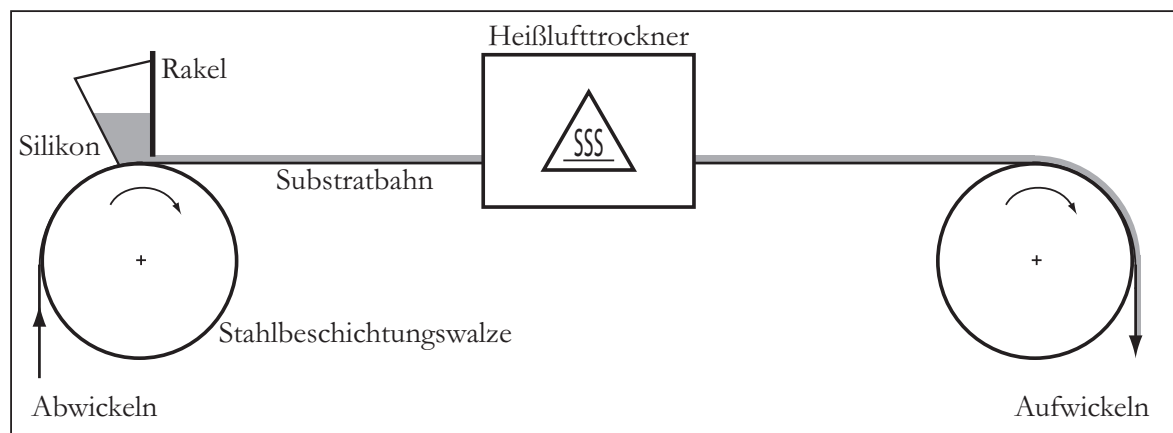


Abbildung 5.1.: Schematische und vereinfachte Darstellung des Bahnlaufs im COATEMA Smart Coater SC07.

Die Probenherstellung mittels Filmziehen-rund erfolgte auf einem COATEMA Smartcoater SC07 (Technische Daten im Anhang D). Eine schematische Darstellung des Bahnlaufs durch den Smartcoater ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Substratbahn wird im Smart Coater ab- und wieder aufgewickelt (in Abb. 5.1 nicht dargestellt). Dazwischen erfolgt der Auftrag des Silikons, das sich in einem Reservoir befindet. Die Trocknung erfolgt unmittelbar nach dem Auftrag, indem die Bahn durch einen 50 cm langen Heißlufttrockner geführt wird. Da die Bahn noch im Smart Coater wieder aufgewickelt wird und die entstandene Silikonschicht schnell in Kontakt mit der nächsten Substratschicht kommt, ist eine vollständige Vernetzung bis dahin essentiell. Aus diesem Grund wurde im Heißlufttrockner eine höhere Temperatur (140 °C) als

bei den bisherigen Versuchen eingestellt<sup>1</sup>. Während des Beschichtungsvorgangs konnte ein rautenförmiges Muster auf der Schicht beobachtet werden. Dieses blieb nach der Trocknung erhalten. Der Ursprung des Musters wurde bisher nicht gefunden. Die Proben wurden für die nachfolgende Auswertung von der Rolle abgewickelt und per Hand in ca. 20 cm lange Bogen geschnitten. Die Prozessparameter der Probenherstellung mittels Filmziehen-rund sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2.: Prozessparameter für Probenherstellung mittels Filmziehen-rund.

Filmziehen-rund	
Gerät	COATEMA Smart Coater SC07
Substrat	Hostaphan GN 4660, Dicke 96 $\mu\text{m}$ , 120 mm breite Bahn
Rakelhöhe, $\mu\text{m}$	$196 = 96 \text{ (Substrat)} + 100 \text{ (Schicht)}$
Geschwindigkeit, mm/s	ca. 1,7 (= 0,1 m/min.)
Trocknung	140 °C (entspricht einer Dauer von ca. 5 Min.)

Die Probenherstellung mittels Siebdruck erfolgte an der Labordruckmaschine KAMMANN K15Q SL. Um den eventuellen Einfluss der Druckform zu untersuchen, wurden dabei zwei verschiedene Siebe mit Vollflächenmotiv (Rechteck  $12 \times 11 \text{ cm}^2$ ) verwendet: Ein feines 140-34 und ein grobes 61-64<sup>2</sup>. Die Druckmaschine ist mit einem gesinterten Keramiktisch ausgestattet, der an eine Vakuumpumpe angeschlossen ist. Das zu bedruckende Substrat wird durch das erzeugte Vakuum an den Tisch angesaugt und festgehalten. Nach dem Druckvorgang wird das bedruckte Substrat vom Keramiktisch abgezogen und in den VÖTSCH Umlufttrockner<sup>3</sup> zur thermisch beschleunigten Vernetzung gebracht. Eine thermische Behandlung ohne Platzwechsel (wie beispielsweise im Filmziehen-flach anhand des ELSTEIN IR-Strahlers) ist hier aus Gründen der Konstruktion nicht umsetzbar. Hierbei traten Probleme auf, die sich in blumen- und sternförmigen Mustern auf den Silikonschichten äußerten (s. Abb 5.2 a)). Da alle beteiligten Materialien (Rakel, Substrat, Siebgewebe, Keramiktisch und Silikon) starke Dielektrika sind, entstand eine hohe statische Aufladung (bis zu 50 kV/m, gemessen mit dem Influenz-Elektrofeldmeter ELTEX EMF 58 auf einer gedruckten Schicht direkt nach dem Druckvorgang) wegen der durch den Druckvorgang bedingte Reibung. Die statische Aufladung wurde durch die für die Winterzeit typische niedrige Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum verstärkt. Die Muster entstanden beim Abziehen der Druckprobe vom Keramiktisch bei den niederviskosen WACKER Elastosil P 7670 und PK 16 Silikon. Die Aufladung konnte durch die gegebenen Versuchsbedingungen nicht abgeleitet werden. Daher wurde das Substrat für die oben genannten Silikone auf einer Metallablage befestigt, die wiederum auf den Keramiktisch gelegt wurde (s. Abb 5.2 b)). Diese Maßnahme bekämpfte zwar nicht die Aufladung, erlaubte es aber, die Schicht, ohne diese abziehen zu müssen, in den Umlufttrockner zu bringen. Da vernetzte das

<sup>1</sup>Nach LOTZ hat eine Temperaturerhöhung während der Vernetzung keinen oder minimal positiven Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der entstehenden Silikonschicht [76].

<sup>2</sup>Üblich ist eine Bezeichnung der Siebe anhand der Anzahl der Fäden pro Zentimeter und der Fadenstärke in Mikrometer. So besitzt das 140-34 Sieb 140 Fäden pro Zentimeter, jeder Faden ist 34  $\mu\text{m}$  dick.

<sup>3</sup>Technische Daten zum VÖTSCH Umlufttrockner sind im Anhang D aufgeführt.

## 5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung

Silikon und wechselte seinen Aggregatzustand von flüssig auf fest. Somit hatte die Aufladung keinen Einfluss auf die Eigenschaften der festen Schicht. Danach konnte die Probe ohne Auftreten von Schichtdefekten von der Metallablage abgezogen werden. Die Prozessparameter für die Probenherstellung mittels Siebdruck sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

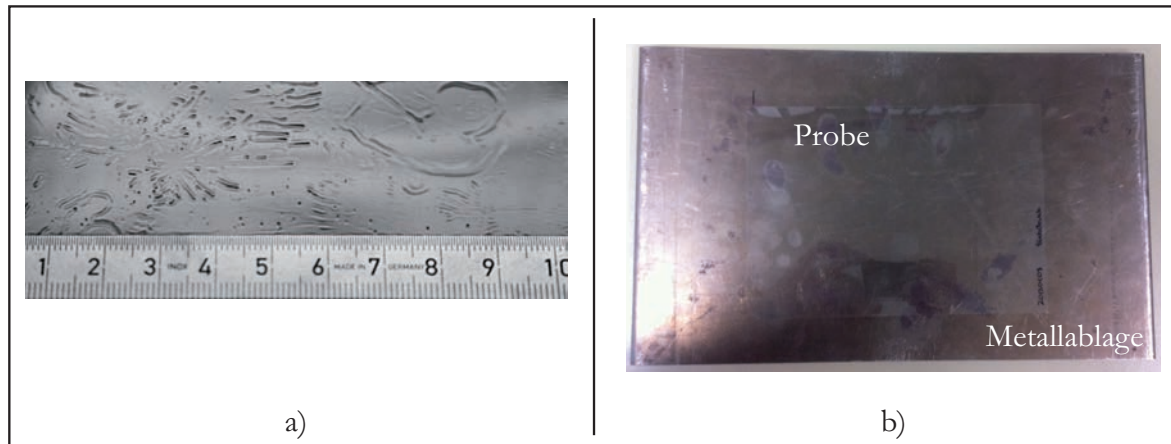


Abbildung 5.2.: Aufladungsproblem beim Siebdruck und seine Lösung. a) Durch die statische Aufladung verursachte Muster (kontrastverstärkte Aufnahme). b) Benutzung der Metallablage als Substrathalterung.

Tabelle 5.3.: Prozessparameter für Probenherstellung mittels Siebdruck.

Siebdruck	
Gerät	Laborsiebdruckmaschine KAMMANN K15Q SL
Substrat	Hostaphan GN 4660, Dicke 175 $\mu\text{m}$ , Größe 120×220 mm <sup>2</sup>
Rakel	85 ° Shore A
Rakelwinkel	77,5 °
Rakelanstellkraft	3,5 bar
Druckgeschwindigkeit	0,5 m/s
Absprung	3 mm
Siebe	grob 61-64; fein 140-34
Thermische Behandlung	Umlufttrockner. 130 °C 3 Min.
Sonstiges	WACKER Elastosil P 7670 und PK 16: Metallablage als Substrathalterung

In jedem Herstellungsverfahren und ggf. Parametersatz wurden drei bis vier Proben hergestellt. Diese können nun optisch charakterisiert werden. Der neu konzipierte Prüfstand zur Durchführung der Experimente mittels Schattenabbildung wird im Folgenden vorgestellt.

## 5.2. Aufbau und Durchführung der Charakterisierung

Für die Durchführung der Versuche wurde ein Prüfstand konzipiert. Die in Kapitel 4.3 aufgelisteten Defizite des Versuchsaufbaus der Machbarkeitsstudie wurden bei der Konstruktion des Prüfstands berücksichtigt und dadurch beseitigt.

### 5.2.1. Verbesserung des Prüfstands im Vergleich zum Versuchsaufbau der Machbarkeitsstudie

Im Folgenden werden die Lösungen zur Verbesserung des Prüfstands im Vergleich zum Versuchsaufbau der Machbarkeitsstudie vorgestellt:

**Reflexionsverhalten des Schirms.** Auf manchen Schattenabbildungen aus der Machbarkeitsstudie (Abb. 4.5: 1, 3, 10 auf S. 71) ist ein heller Fleck zu sehen. Dieser wurde durch den Schirm verursacht, der ein ungünstiges Glanzverhalten aufwies. Das bedeutet, dass das einfallende Licht nicht gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert wird, wie es bei einer diffusen Reflexion der Fall wäre. Ein bedeutender Anteil der Strahlung wird in eine bevorzugte Richtung reflektiert. Das Reflexionsverhalten wird als gemischt bezeichnet (Abb. 5.3). Hohe Intensitätswerte im hellen Fleck verfälschen das Ergebnis der Schichtcharakterisierung.

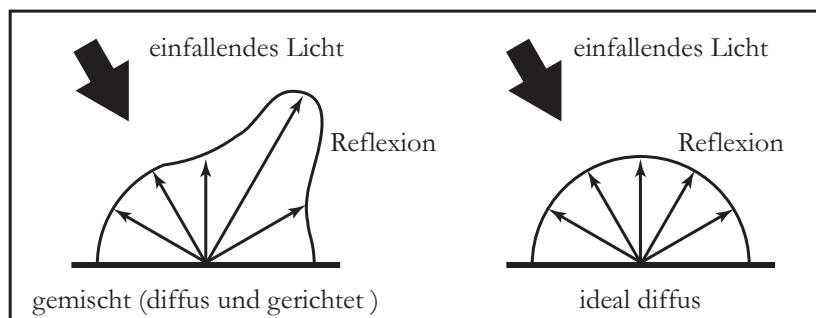


Abbildung 5.3.: Gemischte und ideal diffuse Reflexion an einer Oberfläche. Eine diffuse Oberfläche reflektiert das einfallende Licht gleichmäßig in alle Richtungen. Eine Oberfläche mit gemischter Reflexion hingegen reflektiert das Licht bevorzugt in eine Richtung.

Dies kann durch die Verwendung eines matten Schirms behoben werden. Anstatt des weiß beschichteten Plexiglasses wird in den Hauptversuchen eine Leinwand eingesetzt. Diffuse Leinwände werden anhand ihres Typs und Gain-Faktors beschrieben. Der Typ bezeichnet das Reflexionsverhalten der Leinwand, es gibt Leinwandtypen D, B, R, S, wobei eine diffuse Leinwand mit Typ D bezeichnet wird. Der Gain-Faktor zeigt den Unterschied zwischen dem Reflexionsverhalten für eine Betrachtungsrichtung einer Leinwand und dem eines matten Weißstandards. Das heißt, dass ein Gain-Faktor von 1 ein richtungsunabhängiges Reflexionsverhalten verspricht.

Die CELEXON Stativleinwand Economy  $133 \times 133$  cm ist vom Typ D und besitzt einen Gain-Faktor von 1,0. Diese zwei Eigenschaften charakterisieren diese Leinwand als nahe zu ideal matt und weiß und machen den eventuellen Einfluss der Leinwand auf die Schattenabbildungen vernachlässigbar, was sich bei den Versuchen bestätigte.

## 5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung

Deshalb wird diese als Schirm im Prüfstand verwendet. Tabelle 5.4 stellt die wichtigsten Charakteristiken der Leinwand dar.

Tabelle 5.4.: Charakteristiken der CELEXON Stativleinwand Economy  $133 \times 133$  cm [19].

Abmessungen, cm	$133 \times 133$
Leinwand-Typ	D (diffus)
Gain-Faktor	1,0 (richtungsunabhängig)
Aufbau	Stativ

**Fixierung und Positionierung der Probe.** Aufgrund unterschiedlicher Herstellungsarten sind die Proben unterschiedlich groß. Um alle Proben im Prüfstand fixieren zu können, wurde bei den Vorversuchen auf eine einfache Lösung gesetzt. Alle Proben wurden an der oberen Kante mit einer aufgehängten länglichen Klemme gehalten. Diese Befestigungsart ist aufgrund folgender Aspekte nicht optimal.

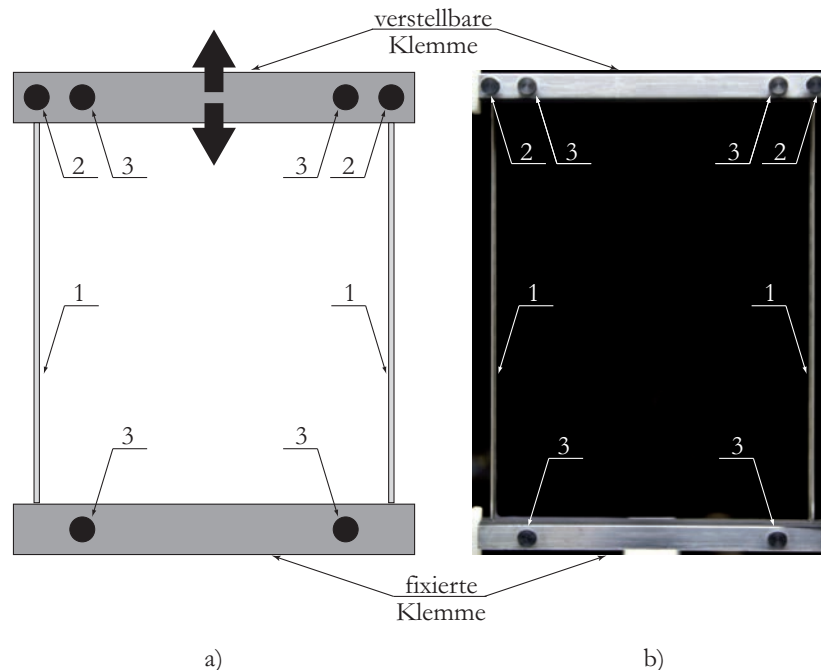


Abbildung 5.4.: Verstellbare Probenhalterung a) Schematische Zeichnung. b) Foto. Obere Klemme kann entlang der Metallführungen 1 verschoben und anhand der Schrauben 2 in jeder Position fixiert werden. Schrauben 3 dienen zur Fixierung von Proben. Eine bis ca. DIN A4 große Probe kann befestigt werden.

Die Proben (vorzüglich die Polymersubstrate) können sich während der Herstellung oder Lagerung verformen. Um den Einfluss dieser Verformungen auf die Schattenabbildungen zu minimieren, müssen die Proben an zwei Kanten eingespannt werden, und nicht nur an einer wie in der Machbarkeitsstudie. Dazu wurde eine neue Probenhalterung konstruiert, die in Abbildung 5.4 als Zeichnung und als Foto dargestellt ist. Diese besteht aus zwei Klemmen, von denen eine fest fixiert ist. Die andere kann entlang zweier Führungen nach oben und nach unten verschoben werden, die Endposition wird durch zwei Schrauben fixiert.



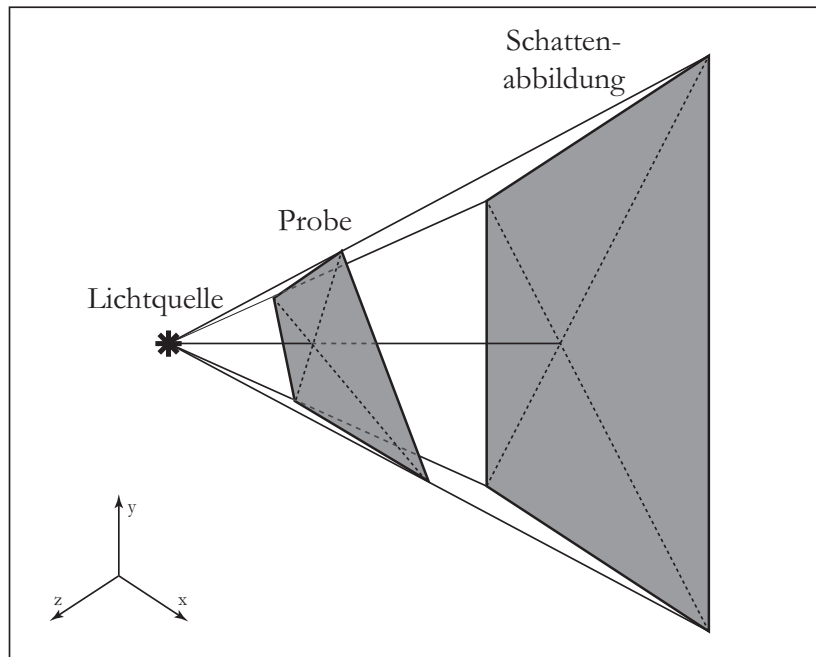


Abbildung 5.5.: Schematische Darstellung der verzerrten Schattenabbildung im Falle der Antiparallelität zwischen Probe und Schirm am Beispiel einer gekippten und verformten Probe. Die Geometrien der Probe und der Schattenabbildung stimmen nicht mehr überein.

Weiterhin war die ursprüngliche Halterung nicht mit dem Rest des Prüfstands fest verbunden. Da jede Probe einzeln zu befestigen ist, kann dies evtl. zu leichten Variationen in der Position und Ausrichtung der Probe führen. Als Folge ist dadurch die Parallelität der Probe und des Schirms nicht mehr gewährleistet. Sollten die Probe und der Schirm nicht parallel sein, so wird der Abstand zwischen Probe und Schirm  $k$  nicht mehr für alle Punkte auf der Probe eingehalten. Das resultiert in geringerem Kontrast und/oder Verzerrung der Schattenabbildung. Ungleichmäßiger Kontrast über der Probenfläche kann zur fehlerhaften Interpretation führen. Die Verzerrung führt dazu, dass die Schattenabbildung nicht mehr der Geometrie der Probe entspricht, was ebenso die Ergebnisse verfälscht (Abb. 5.5). Daher ist es wichtig, dies bei der Konstruktion des Prüfstands zu berücksichtigen und die Probenhalterung parallel zum Schirm zu positionieren, sodass eine einmalig eingestellte Parallelität nicht mehr verändert wird.

**Lichtquelle.** Die für die Machbarkeitsstudie benutzte blaue LED erzeugte einen niedrigen Lichtstrom. Die radiometrische Leistung der LUXEON STAR Königsblau bei dem maximal zulässigen Strom von 350 mA beträgt 150 mW, was einem Lichtstrom von ca. 102 lm entspricht (für ausführliche Informationen vgl. Anhang D.1). Da sie die einzige Lichtquelle im Raum war, war der Einsatz der Kamera dadurch erschwert. Wie im Kapitel 4.1 beschrieben, musste ein Kompromiss zwischen einer niedrigen ISO-Zahl, Blende und Belichtungszeit gefunden werden. Ein zusätzliches Problem stellte das Fokussieren der Kamera in der dunklen Umgebung dar. Die Wellenlänge der benutzten LUXEON STAR liegt mit 455 nm im blauen Bereich des sichtbaren Spektrums. Die schwache Leistung sowie der blaue Farbton sind nicht optimal für die visuelle Beurteilung der Schattenabbildungen.

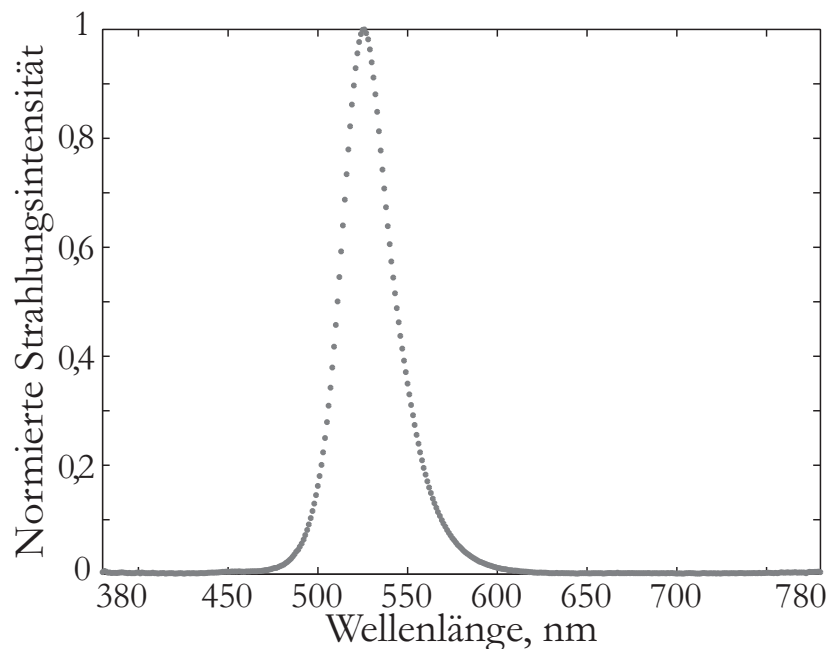


Abbildung 5.6.: Spektrum der grünen LUXEON Rebel LED, gemessen mit einem Spektralradiometer Konica Minolta CS-1000A im Wellenlängenbereich 380 – 780 nm mit Schritt 1 nm.

Bei der Suche nach einer LED mit diesbezüglich besseren Eigenschaften fiel die Wahl auf eine High-Power LED LUXEON Rebel im grünen Wellenlängenbereich (typische Wellenlänge 530 nm, Halbwertsbreite 30 nm, siehe Anhang D.1). Das gemessene Spektrum der LED ist der Abbildung 5.6 zu entnehmen. Diese LED kann mit höherem Strom betrieben werden und dadurch einen stärkeren Lichtstrom erzeugen (beim Strom von 700 mA beträgt der Lichtstrom 161 lm (für ausführliche Informationen vgl. Anhang D.1)), als die in der Machbarkeitsstudie verwendete LED. Da das menschliche Auge das Maximum seiner Hellempfindlichkeit im grünen Bereich des Spektrums hat (555 nm) [121], wurde eine grüne LED ausgewählt, um die nachfolgende visuelle Auswertung zu erleichtern.

**Aufnahmesystem und seine Positionierung.** Die in den Vorversuchen eingesetzte digitale Spiegelreflexkamera wird für die Hauptversuche durch eine neuartigere und hochwertigere ersetzt. Die Vorteile der CANON EOS 5D MK II gegenüber der CANON EOS 450D sind nicht zu übersehen. Zum einen besitzt die CANON EOS 5D MK II (s. Anhang D.2) einen Vollformatsensor, was eine sehr hohe Auflösung als Folge hat. Dadurch gehen die feinen Details der Schattenabbildungen nicht verloren, was maßgeblich zur Qualität der Auswertung beiträgt. Außerdem ist das Rauschverhalten dieser Kamera unvergleichlich besser, als das der EOS 450D. Auch bei hohen ISO-Werten bleiben die Aufnahmen fast rauschfrei. Dies ist vor allem für den Schattenabbildungseinsatz wichtig, weil die LED die einzige Lichtquelle im komplett schwarz gestrichenen Raum ist und starkes Rauschen die Messergebnisse verfälschen kann.

Die Position der Kamera relativ zur Leinwand und zur Probe spielt ebenso eine wichtige Rolle. Eine Verschiebung der Kamera im Raum führt unmittelbar zur perspektivischen Verzerrung des aufzunehmenden Motivs. Es ist allerdings unmöglich, bei gegebener Ausstattung die Kamera direkt auf die optische Achse zu platzieren, sodass sie mit

der Probe und der Schattenabbildung zentriert wäre und der von der Kamera entstehende Schatten keine Überlagerung mit der Schattenabbildung der Probe hat. Dies wäre durch Hinzufügen zusätzlicher optischer Elemente möglich, was das Ziel dieser Arbeit – eine möglichst sparsame und einfache Lösung zu finden – verfehlen würde. Eine Zentrierung der Kamera könnte ebenfalls durch Benutzung einer Ringbeleuchtung am Kameraobjektiv anstatt der oben genannten LED erreicht werden. Eine Ringbeleuchtung wird so an das Objektiv angebracht, dass das Objektiv von der Beleuchtung umrandet wird. Dieser Aufbau gewährleistet allerdings keine punktuelle Lichtquelle und kann daher nicht umgesetzt werden. Eine verzerrte Aufnahme könnte beispielsweise anhand Verzerrungsfilter in Adobe Photoshop entzerrt werden, allerdings wäre dies eine unerwünschte Option, da die Mechanismen, die dahinter stehen, nicht bekannt sind. Für die anschließende Datenauswertung ist jegliche nicht komplett nachvollziehbare Datenveränderung zu vermeiden.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die variierende Schärfentiefe unterschiedlicher Punkte auf der Schattenabbildung. Wie aus der Abbildung 5.7 ersichtlich, sind die Strecken OA und OB unterschiedlich lang. Durch diesen Gangunterschied werden die beiden Punkte A und B unterschiedlich scharf auf den Kamerasensor abgebildet. Dieser Effekt kann durch die Wahl einer höheren Blendenzahl (kleinere Blendenöffnung) verringert werden. Dahingehend müssen die restlichen Aufnahmeparameter angepasst werden. Je weiter die Kamera in x- oder y-Richtung verschoben wird, desto stärker tritt der Effekt auf. Unter Berücksichtigung der aufgezählten Faktoren ist es sinnvoll den Abstand zwischen der Kamera und der optischen Achse zu minimieren, was im Prüfstand umgesetzt wurde.

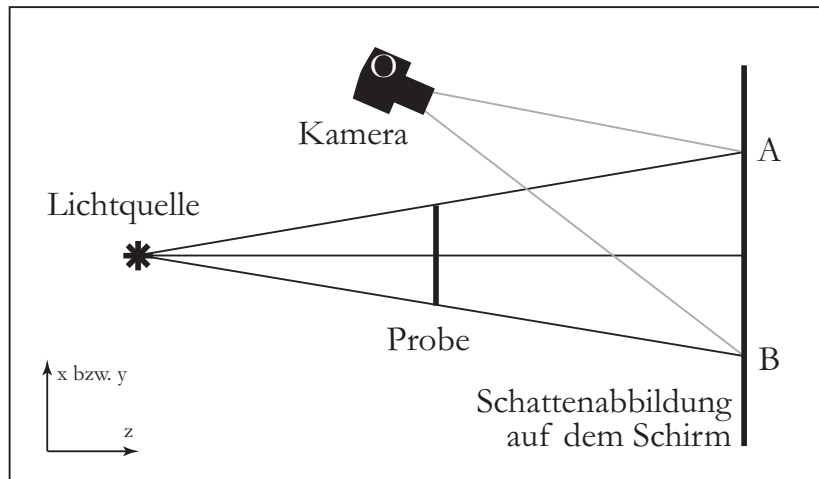


Abbildung 5.7.: Kameraposition relativ zur optischen Achse, Blick von oben. Der Längenunterschied der Strecken OA und OB führt zur unterschiedlichen Abbildungsschärfe der Punkte A und B auf dem Sensor der Kamera.

Die in diesem Kapitel aufgelisteten Punkte sind in die Konstruktion des für die vorliegende Arbeit finalen Prüfstands eingeflossen. Der finale Prüfstand wird im Folgenden vorgestellt.

### 5.2.2. Der Aufbau des Prüfstands

Das Grundprinzip der direkten Schattenabbildung, sowie die geometrische Anordnung der Elemente aus der Machbarkeitsstudie werden in die Konstruktion des Prüfstands übernommen. Die Abmessungen des Prüfstands und sein Aufbau sind in Abbildungen 5.8 und 5.9 dargestellt. Wie bereits der Versuchsaufbau in der Machbarkeitsstudie, wird der neue Prüfstand im schwarz gestrichenen Raum aufgebaut. Bei der Durchführung der Experimente dient die LED als einzige Lichtquelle im Raum. Alle Elemente bis auf die Leinwand werden an einem Grundgestell fixiert. So kann gewährleistet werden, dass die Elemente ihre Position nicht verlieren. Die zu untersuchende Probe wird im Grundgestell in der Probenhalterung ① eingespannt. Die Probenhalterung ① kann nach oben oder unten verschoben werden, sodass die Probe unabhängig von ihrer Größe immer senkrecht zentriert werden kann. Zur senkrechten Probenzentrierung und -ausrichtung dient das Lineal ②. Die grüne LUXEON Rebel LED ③ ist am Grundgestell befestigt. Das Aufnahmesystem besteht aus einem Fotostativ ④ und einer CANON EOS 5D MK II Kamera ⑤, die darauf befestigt wird. Die Kamera befindet sich nah an der optischen Achse des Prüfstands und ist so ausgerichtet, dass die äußere Objektivlinse sich in der Probenebene befindet. Die Kameraposition ist durch den horizontalen Abstand von ca. 3,5 cm und den vertikalen Abstand von ca. 13 cm von der optischen Achse zur Objektivmitte gegeben. Der Abstand ⑥ zwischen der LED und der Probe  $m = 1$  m ist nicht variierbar. Das Grundgestell verfügt über verstellbare Füße ⑦, um eventuelle Unebenheiten im Boden auszugleichen. Die Leinwand ⑧ befindet sich vor dem Grundgestell. Der Abstand zwischen der Probenebene und Leinwand entspricht  $k = 1$  m.

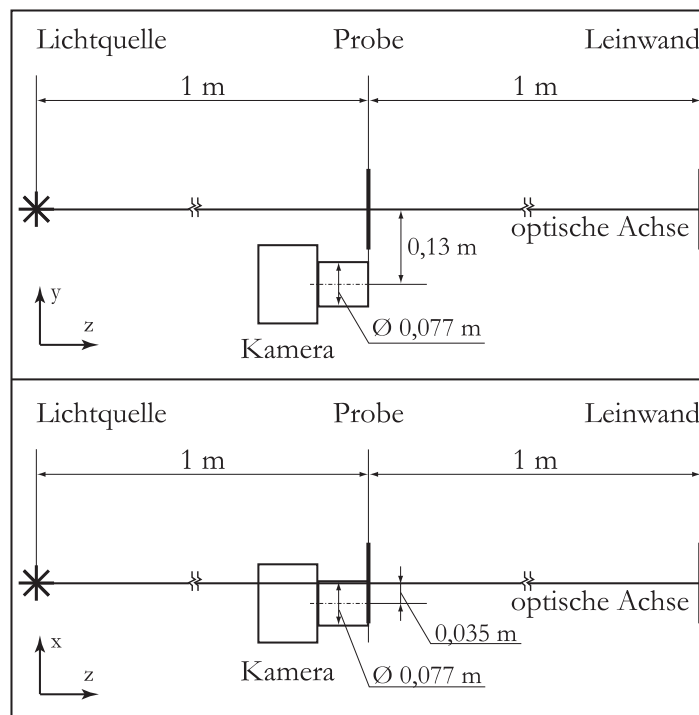


Abbildung 5.8.: Abmessungen des Prüfstands in Seitenansicht (oben) und in Draufsicht (unten).

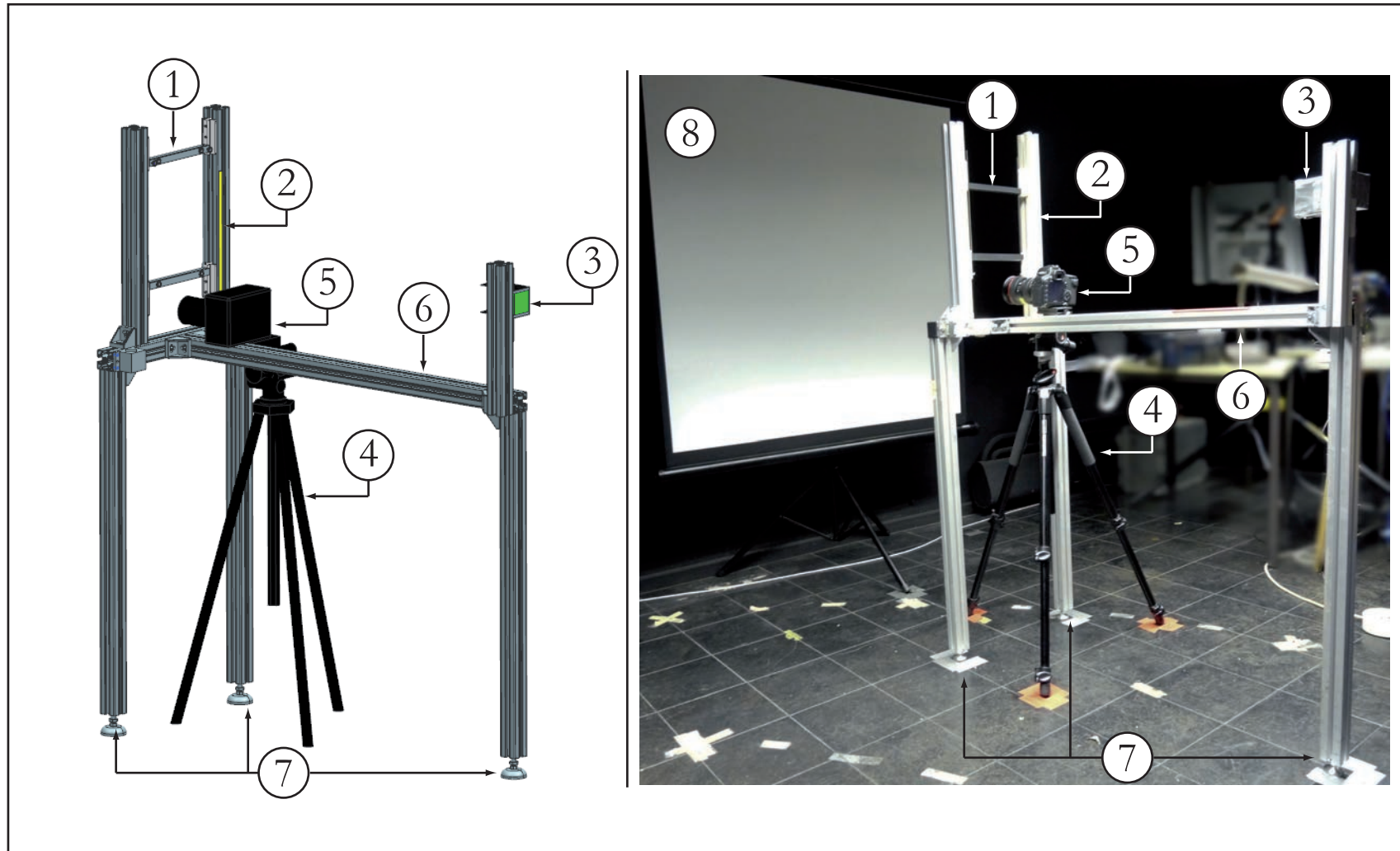


Abbildung 5.9.: Prüfstand zur Charakterisierung von transparenten Proben mittels Schattenabbildungsmethode: CAD-Zeichnung links und Foto des Prüfstandes im schwarz gestrichenen Raum rechts. 1 - Probenhalterung (Probe nicht abgebildet). 2 - Lineal als Hilfe zum senkrechten Zentrieren der Probe. 3 - LED. 4 - Kamerastativ. 5 - Kamera mit Objektiv. 6 - Abstand zwischen LED und Probe  $m = 1$  m. 7 - verstellbare Füße. 8 - Leinwand (auf der CAD-Zeichnung nicht abgebildet).

### 5.2.3. Durchführung der Charakterisierung

Zur Versuchsdurchführung wird jeweils eine Probe in der Probenhalterung des Prüfstands eingespannt. Die Raumbeleuchtung wird ausgeschaltet, sodass die Probe nur von der LED beleuchtet wird. Die nun an der Leinwand sichtbare Schattenabbildung der jeweiligen Probe wird fotografiert und gespeichert. Die Kameraeinstellungen sind in Tabelle 5.5 aufgeführt. Abbildung 5.10 zeigt den Prüfstand während der Versuchsdurchführung.

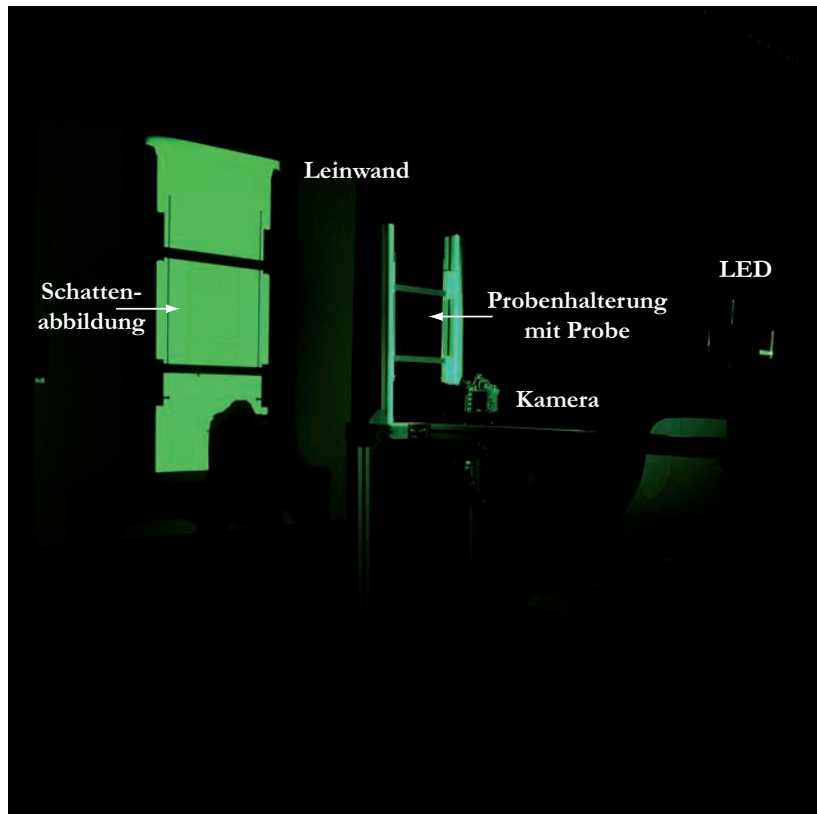


Abbildung 5.10.: Prüfstand während der Versuchsdurchführung. Im schwarz gestrichenen Raum ist die LED die einzige Beleuchtung. Die Probe ist in der Probenhalterung befestigt. Die Schattenabbildung wird auf die Leinwand projiziert.

Tabelle 5.5.: Kameraeinstellungen für die Versuchsdurchführung (ausführliche Informationen über grundlegende Kameraeinstellungen sind im Anhang A zu finden).

Blendenzahl	5,6
Belichtungszeit	1/5 s
ISO-Wert	1000

### 5.3. Auswertung der Versuchsdaten und Definition des Homogenitätswerts

Wie bereits bei der Machbarkeitsstudie, liegen die Aufnahmen der Schattenabbildungen als CR2-Dateien (RAW-Format, das von CANON-Kameras generiert wird) vor. Die nachfolgende Auswertung der Daten setzt sich aus zwei Bereichen zusammen:

- Visuelle Beurteilung der Schattenabbildungen und
- Mathematische Analyse der gewonnenen Daten.

Dementsprechend werden die Dateien für die Auswertung vorbereitet. Der erste Schritt wird aus der Machbarkeitsstudie übernommen. Dabei erfolgt im „Camera Raw“-Plugin (Version 6.6) des Adobe Photoshop (Version CS5.1) ein Zuschchnitt der Aufnahmen, sodass die dadurch entstehenden Bilder nur die Schattenabbildungen der Probe beinhalten (vgl. Schritt 1 in Abb. 5.11). Die Ausschnitte werden als TIFF-Dateien ohne Kompression abgespeichert und können für die visuelle Beurteilung verwendet werden. Für die nachfolgende mathematische Analyse werden die TIFF-Dateien in Matlab<sup>4</sup> (Versionen R2010a und R2013a) eingelesen. Mithilfe des Befehls `rgb2gray` der *Image Processing Toolbox* [141] werden die Informationen der drei Farbkanäle in Graustufen umgerechnet (vgl. Schritt 2 in Abb. 5.11). Die Umwandlung in Graustufen ist legitim und ausreichend für die nachfolgende Auswertung, da es sich dabei um Änderungen der Lichtintensität handelt. Demnach sind die Farbinformationen der drei Farbkanäle nicht relevant, sondern nur die Helligkeitswerte.

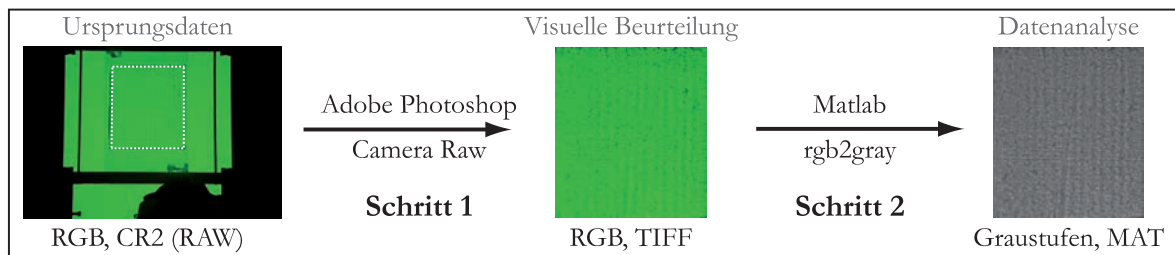


Abbildung 5.11.: Datenumwandlung auf dem Weg zur Auswertung. Die ursprüngliche farbige (RGB) Aufnahme der Schattenabbildung liegt im CR2-Format (RAW) vor. Schritt 1: Der Zuschchnitt der Ursprungsbilder (weiße Konturlinie) in „Camera Raw“-Plugin des Adobe Photoshop und die Abspeicherung als TIFF-Datei. Schritt 2: Umwandlung in Graustufen in Matlab mithilfe des Befehls `rgb2gray` und Speicherung in Form einer Matrix als MAT-Datei.

Die Helligkeitswerte aller Pixel eines Bildes werden anhand der Graustufenwerte (GSW) wiedergegeben. Die Graustufenwerte können zwischen 0 (dunkelster Wert) und  $2^{16} = 65536$  (hellster Wert) liegen und entsprechen der relativen vom Kamerasensor aufgenommenen Lichtintensität der Schattenabbildung. Somit kann jede Schattenabbildung als eine Matrix mit  $i = 1 \dots a$  Zeilen und  $j = 1 \dots b$  Spalten dargestellt werden. Die Größe der Matrix in Pixel  $\{a \cdot b\}$  wird bei der konstanten Kameraauflösung durch die Probengröße und die Größe des Bildausschnitts bestimmt. Bei der verwendeten Kamera CANON EOS 5D MK II beträgt die Pixelgröße  $6,4 \mu\text{m}$ . Jede Zelle der Matrix

<sup>4</sup>Matlab ist eine Abkürzung für *Matrix Laboratory* und ist eine Software der Firma THE MATHWORKS, die die Lösung mathematischer Probleme mithilfe Matrizen ermöglicht [54]. Diese und alle darauf folgenden Kalkulationen werden in Matlab vorgenommen.



## 5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung

beinhaltet den jeweiligen GSW des Pixels  $i, j$ :

$$\begin{matrix} & 1 & 2 & \dots & j \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \end{matrix} & \left( \begin{matrix} GSW_{1,1} & GSW_{1,2} & \dots & GSW_{1,j} \\ GSW_{2,1} & GSW_{2,2} & \dots & GSW_{2,j} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ GSW_{i,1} & GSW_{i,2} & \dots & GSW_{i,j} \end{matrix} \right) \end{matrix}$$

Schattenabbildungen in dieser Form können nun mathematisch ausgewertet werden. Eines der Ziele der vorliegenden Arbeit ist es, die passende Kombination von Verfahren und Material zu finden, die die Herstellung von großflächigen Silikonschichten ermöglicht. Neben dem visuellen Vergleich einzelner Schattenabbildungen ist es ratsam, einen Zahlenwert zu haben, der eine Aussage über die Schichthomogenität und somit einen direkten Vergleich zwischen einzelnen Proben erlaubt. Dementsprechend wird der *Homogenitätswert*  $H$  im Folgenden vorgestellt.

Aus den Berechnungen in Kapitel 3.3.3 folgt, dass die Krümmung der Schichtoberfläche  $\nabla^2 h$  und die Änderung der gemessenen Lichtintensität der Schattenabbildungen, sprich die Änderung der GSW, in direkter Proportionalität stehen:

$$\nabla^2 h_{i,j} \sim \delta GSW_{i,j} \quad (5.1)$$

Für die vorliegenden Schattenabbildungen werden demnach für jedes Pixel die partiellen Gradienten der GSW  $\text{grad}(GSW_{i,j})_x$  und  $\text{grad}(GSW_{i,j})_y$  für die Koordinatenrichtungen  $x$  (waagrecht) und  $y$  (senkrecht) ausgerechnet. Die von null abweichenden partiellen Gradienten der GSW beschreiben eine Änderung der Krümmung. Je größer dabei der Betrag des Gradienten ist, desto größer ist die Krümmungsänderung. Die Anwendung des totalen Gradienten als Summe der partiellen zur Charakterisierung der Änderung der Oberflächenkrümmung ist an dieser Stelle nicht sinnvoll. Dies ist dadurch bedingt, dass einzelne partielle Gradienten negativ und positiv sein können und sich bei einer Addition ausgleichen. Der totale Gradient wäre dann gering, obwohl in beiden Richtungen eine Änderung der GSW und dementsprechend der Krümmung der Schicht vorliegt. Um den Einfluss der Vorzeichen der einzelnen Gradienten auszuschließen, wird das quadratische Mittel der GSW-Gradienten in beiden Koordinatenrichtungen  $x$  und  $y$  über die Pixelanzahl der Schattenabbildung  $\{a \cdot b\}$  zur Definition des Homogenitätswertes  $H$  der zu untersuchenden Schicht herangezogen:

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b [(\text{grad}(GSW_{i,j})_x)^2 + (\text{grad}(GSW_{i,j})_y)^2]}{a \cdot b}} \quad (5.2)$$

Der Homogenitätswert  $H$  wurde zur Beschreibung der mittleren Schichthomogenität der Probe geschaffen. Er besitzt die Einheit  $[1/\text{Pixel}]$  und hängt somit von dem Kameramodell und der verwendeten Auflösung ab. Im Falle einer ideal homogenen Probe beträgt  $H$  null. Je inhomogener die Probe, desto höher der Homogenitätswert  $H$ .

Mithilfe des Homogenitätswertes  $H$  können Proben mit unterschiedlicher Schichthomogenität effektiv miteinander verglichen, Versuchsreihen ausgewertet werden. Der Homogenitätswert  $H$  trifft allerdings nur Aussagen über die durchschnittliche Homogenität der Schicht und nicht über die Qualität der Inhomogenitäten. Es können damit also



keine Inhomogenitätsarten unterschieden werden. Ebenfalls kann damit keine Aussage über die Verteilung der Inhomogenitäten getroffen werden, z.B. ob mehrere geringfügige Abweichungen der Schichtdicke oder nur eine hohe Abweichung vorliegt. Dennoch kann dieser Wert zur Beurteilung über einzelne Proben herangezogen werden, da somit eine quantitative Aussage über das Ausmaß der Inhomogenitäten gemacht werden kann. Diese erlaubt es, die Proben mit unterschiedlichen Herstellungsparametern miteinander zu vergleichen und somit deren Auswirkung auf die Schichthomogenität zu beurteilen.

Die beschriebene Auswertungsmethode und der Homogenitätswert  $H$  wird in Matlab zur weiteren Auswertung umgesetzt. Die Ergebnisse der Auswertung und deren Diskussion werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

## *5. Herstellung der Silikonschichten und Durchführung der Charakterisierung*

## 6. Diskussion

Dieses Kapitel ist in zwei Teile gegliedert. Die Aufteilung ergibt sich aus der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit: Der Suche nach geeigneten Materialien und Verfahren zur Herstellung großflächiger Silikonschichten für den Einsatz in dielektrischen Stapelaktoren und der Notwendigkeit der Entwicklung einer neuen Methode zur Charakterisierung der entstandenen Schichten. Die zu charakterisierenden Schichten wurden wie in Kapitel 5.1 beschrieben hergestellt. Dazu wurden mehrere Schichten aus vier Silikonen anhand dreier Herstellungsverfahren ggf. mit variierenden Parametern wie Rakelgeschwindigkeit und Drucksieb produziert. Die im Kapitel 3.3 vorgestellte Charakterisierungsmethode basiert auf dem Prinzip der Schattenabbildung. Somit liegen die Versuchsergebnisse in Form von Schattenabbildungen der Proben vor, die, wie im Kapitel 5.2 beschrieben, aufgenommen wurden.

Anhand dieser bildgebenden Methode können die Schichten bezüglich ihrer Schichthomogenität, die ein wichtiges Qualitätskriterium für dünne Schichten darstellt, charakterisiert werden. Die zu charakterisierenden Schichten können visuell beurteilt werden. Solch eine Lösung stellt für die Druckindustrie kein Novum dar. Im grafischen Druck ist es durchaus üblich, dass erfahrene Drucker ihre visuellen Eindrücke zur Qualitätskontrolle einsetzen. Die Mustererkennung des menschlichen Auges und seine Lernfähigkeit sind evolutionär hoch entwickelt, sehr bedeutsam und daher nicht zu vernachlässigen [116]. Daher basiert ein großer Teil dieser Auswertung auf der visuellen Beurteilung der Schattenabbildungen der jeweiligen Proben. Aufgrund der hohen Anzahl der Proben werden hier nur einige Beispiele gezeigt. Dabei muss beachtet werden, dass in den Abbildungen in der ausgedruckten Version der Arbeit manche feinen Details verloren gehen können. Die im Folgenden beschriebene Analyse der Schattenabbildungen wurde am LCD-Monitor durchgeführt.

Ein weiterer Teil der Auswertung beinhaltet eine mathematische Datenanalyse der Schattenabbildungen anhand des Homogenitätswerts  $H$ . Dieser wurde geschaffen, um eine objektive Aussage über die mittlere Schichthomogenität einer Siliconprobe treffen zu können (vgl. Kapitel 5.3).

Bevor Rückschlüsse über die Qualität der Proben, die Eignung von Materialien und Verfahren und den eventuellen Einfluss der Prozessparameter gezogen werden, erfolgt eine Diskussion der Charakterisierungsmethode. Der erste Schritt dabei ist die Validierung der Methode anhand etablierter Charakterisierungsverfahren. Als Nächstes werden die Grenzen der Methode erforscht. Dabei wird untersucht, welche Merkmale oder Strukturen im Rahmen der Charakterisierungsmethode verlässlich detektierbar sind. Anschließend wird die Übertragbarkeit der Methode auf alternative Materialien aus dem funktionalen Druck untersucht.

## 6.1. Diskussion der Charakterisierungsmethode

Zur Entwicklung einer neuen Messmethode gehört ihre Validierung, also die Überprüfung der Richtigkeit der Methode<sup>1</sup>. Um die Validierung der Schattenabbildungsmethode geht es im Folgenden.

### 6.1.1. Validierung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Charakterisierung von Silikonschichten liefert großflächige Schattenabbildungen der Proben. Zur Validierung von letzteren sind also ebenfalls großflächige Schichtaufnahmen notwendig, die die Topografie (Oberflächenbeschaffenheit) der Schicht darstellen. Diese können mit den entsprechenden Schattenabbildungen verglichen werden.

Die Suche nach einer Methode zur Validierung der in dieser Arbeit entwickelten optischen Methode ist nicht trivial. In Kapitel 3.2 wurden mehrere Methoden beschrieben, die zur Vermessung oder Charakterisierung transparenter Schichten herangezogen werden. Methoden, die großflächige Messungen ermöglichen (ICR, Absorptionsmethode) und somit die Validierung der aktuellen Methode erleichtern würden, sind nicht zur Charakterisierung von Silikonschichten geeignet. Als einzige hier beschriebene Methode kommt die optische 3D-Profilometrie in Frage. Der gravierende Unterschied der mit den Messmethoden innerhalb eines Vorgangs erfassbaren Flächen (Quadratmillimeter und Quadratdezimeter) stellt eine der schwersten Herausforderungen bei der Validierung dar.

Das am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren vorhandene optische Profilometer Sensofar P Lu Neox verfügt über Messmöglichkeiten anhand der konfokalen Mikroskopie und der Weißlichtinterferometrie. Zur Erfassung von größeren Flächen werden die einzelnen vom Profilometer aufgenommenen Bilder automatisch von der dazugehörigen Software SensoScan (Version 3.1.2.16) zusammengefügt, der Prozess wird „Stitching“ genannt. Aufgrund einer großen Datenmenge muss beim Stitching mit einer enormen Rechenleistung und hohem Zeitaufwand gerechnet werden. Der erste Versuch, ein ca.  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  großes Feld einer Siliconprobe im Konfokalmodus zu vermessen, scheiterte nach dem Ende der ca. 33 Stunden andauernden Messung beim Stitching. Aus Zeit- und Rechenleistungsgründen wurde ein neues Messkonzept entwickelt. Dabei wird die Messung im weißlichtinterferometrischen Modus mit einem vorhandenen Objektiv mit minimaler Vergrößerung (fünffach) durchgeführt. Die Methode der Weißlichtinterferometrie ist etwas weniger genau als die der konfokale Mikroskopie, was sich allerdings erst im Nanometerbereich bemerkbar macht. Da die Schichtdicken der Silikonschichten im Mikrometerbereich liegen, kann der Genauigkeitsverlust vernachlässigt werden. Die Messungen im weißlichtinterferometrischen Modus verlaufen unter diesen Bedingungen schneller. Zusätzlich wird das zu messende Feld auf ca.  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  reduziert. Die Dauer einer solchen Messung beträgt ca. neun Stunden und endet mit dem Stitching von ca. 1000 Einzelbildern. Auf diese Weise wurden drei Proben vermessen.

Abbildung 6.1 zeigt den Validierungsweg am Beispiel einer im Filmziehen-flach hergestellten Probe aus Elastosil PK16. Auf der Schattenabbildung (1) und der Pro-

---

<sup>1</sup>Dem Thema Validierung sind mehrere Veröffentlichungen gewidmet. Mehr Informationen dazu können in den Arbeiten von PANSHEF [95], RABE [104] GRADY [38] gefunden werden.

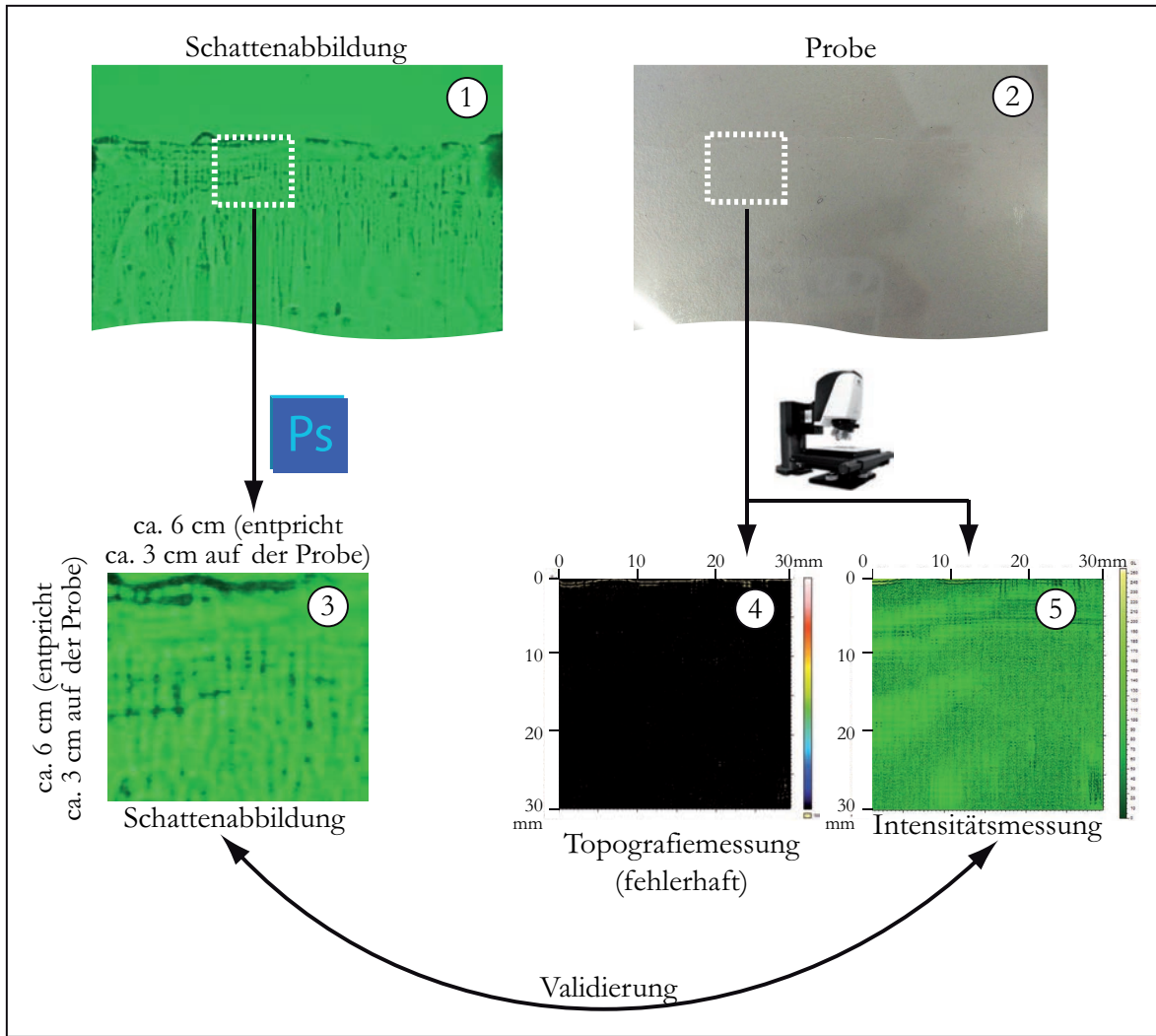


Abbildung 6.1.: Aus der Schattenabbildung (1) und der Probe (2) wird der weiß markierte Bereich zur Validierung herangezogen. Dieser wird mit Adobe Photoshop ausgeschnitten - dabei entsteht die Schattenabbildung (3) - und weißlichtinterferometrisch vermessen - dabei entstehen die Topografiemessung (4) und die Intensitätsmessung (5). Da die Daten der Topografiemessung (4) nicht richtig verarbeitet werden konnten, wird die Validierung anhand des Ausschnitts der Schattenabbildung (3) und der Intensitätsmessung (5) durchgeführt.

be (2) wird ein Bereich ausgesucht (in Abb. 6.1 mit weißer Strichlinie markiert), der zur Validierung herangezogen wird. Bedingt durch die geometrischen Verhältnisse des Prüfstands, ist die Kantenlänge der Schattenabbildung doppelt so groß wie die Probe. Daraus folgt, dass einem ca.  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  großen Bereich auf der Probe ein ca.  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  großer Bereich der Schattenabbildung entspricht. Der Validierungsbereich wird zum einen mit Adobe Photoshop aus der Schattenabbildung (1) ausgeschnitten (links, PS-Zeichen) und zum zweiten auf der Probe weißlichtinterferometrisch vermessen (rechts, Sensofar-Miniatur). Beim Ausschneiden mit Adobe Photoshop entsteht die Schattenabbildung (3). Bei der Messung am Profilmeter entstehen die Topografiemessung (4) und die Intensitätsmessung (5). Bei allen drei auf diese Weise vermessenen Proben wurden die Topografiemessungen trotz gelungener Messungen fehlerhaft abgespeichert. Die wenigen gelben Punkte auf der Topografiemessung (4) stellen die von der Messung nicht

## 6. Diskussion

erfassten Bereiche da. Die Informationen für die restlichen Bereiche wurden vermutlich aufgrund der großen Datenmenge nicht korrekt abgespeichert, was an der schwarzen Färbung und an der abwesenden Skalabeschriftung sichtbar wird. Da die Topografiedaten nicht zu verwenden sind, wird die Validierung anhand der Intensitätsmessung (5) durchgeführt. Die von der Messung nicht erfassten Stellen sind hier schwarz markiert.

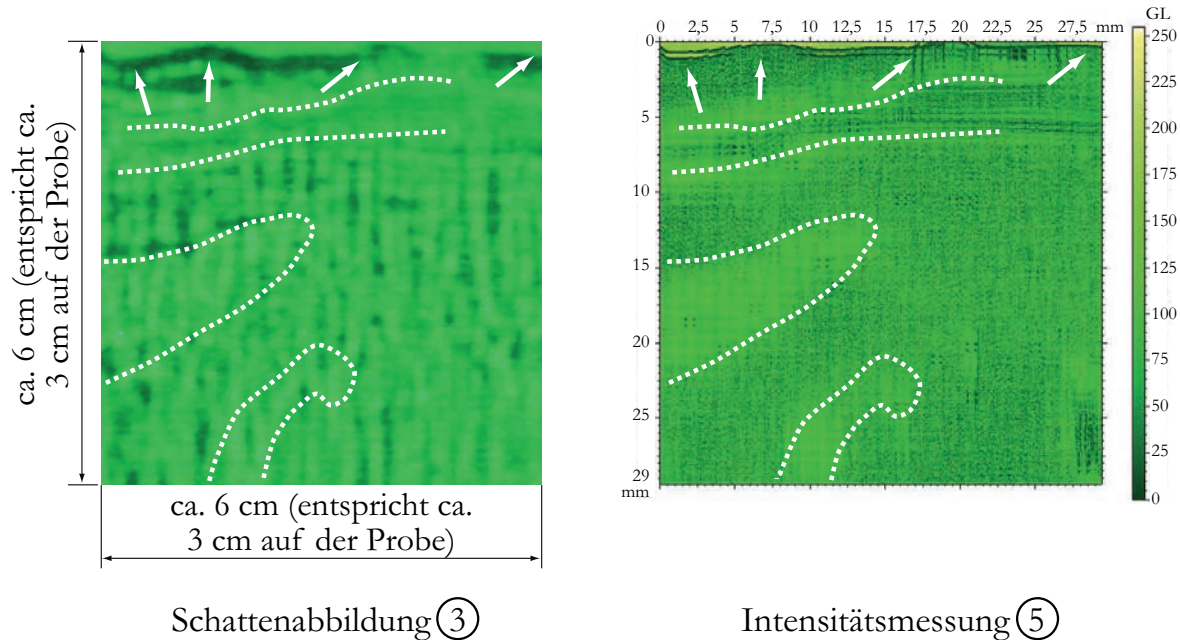


Abbildung 6.2.: Direkter Vergleich der Schattenabbildung (links) und der Intensitätsmessung (rechts). Die weißen Linien markieren jeweils die markanten, erkennbaren Bereiche auf beiden Messbildern. Der Schichtrand ist mit weißen Pfeilen markiert.

Abbildung 6.2 stellt die Schattenabbildung (3) und die Intensitätsmessung (5) desselben Bereichs einer Probe aus der Abbildung 6.1 vergrößert dar. Die Intensitätsmessung entsteht aus dem Helligkeitssignal, das bei der weißlichtinterferometrischen Messung vom Sensor des Profilometers detektiert wird. Diese lässt, auch wie eine Schattenabbildung, nicht auf die genauen Schichtdicken an jedem gemessenen Punkt schließen, gibt dennoch eine Auskunft über die Schichtbeschaffenheit bei der Annahme, dass die optischen Eigenschaften der Schicht und des Substrats über die gemessene Fläche konstant bleiben. Zur Veranschaulichung wurde in der Software SensoMap Plus<sup>2</sup> (Version 5.1.0.5308) eine grünweiße Farbskala auf die Intensitätsmessung angewendet. Das feine Gittermuster bei der Intensitätsmessung resultiert aus einem Darstellungsmerkmal der überlappenden Messbereiche bei zusammengeführten Bildern in SensoMap und SensoScan. Beim direkten Vergleich beider Messbilder fallen eindeutige Ähnlichkeiten auf. Eine davon ist der Verlauf des Schichtrandes, der in Abbildung 6.2 mit weißen Pfeilen markiert ist. Zu den weiteren erkennbaren Merkmalen gehören hellere und dunklere Bereiche, die per Hand mit weißen Strichlinien markiert sind.

Bedingt durch den Verarbeitungsfehler, wodurch die Topografiedaten nicht abgespeichert werden konnten, wird der Validierungsbereich auf ca.  $1,3 \times 3,4 \text{ mm}^2$  erneut reduziert. Der Validierungsablauf wiederholt sich und wird in Abbildung 6.3 dargestellt.

<sup>2</sup>SensoMap Plus ist der Markenname der Software MountainsMap der Firma DIGITALSURF und dient zur Analyse von 2D- und 3D-Oberflächenmessungen.

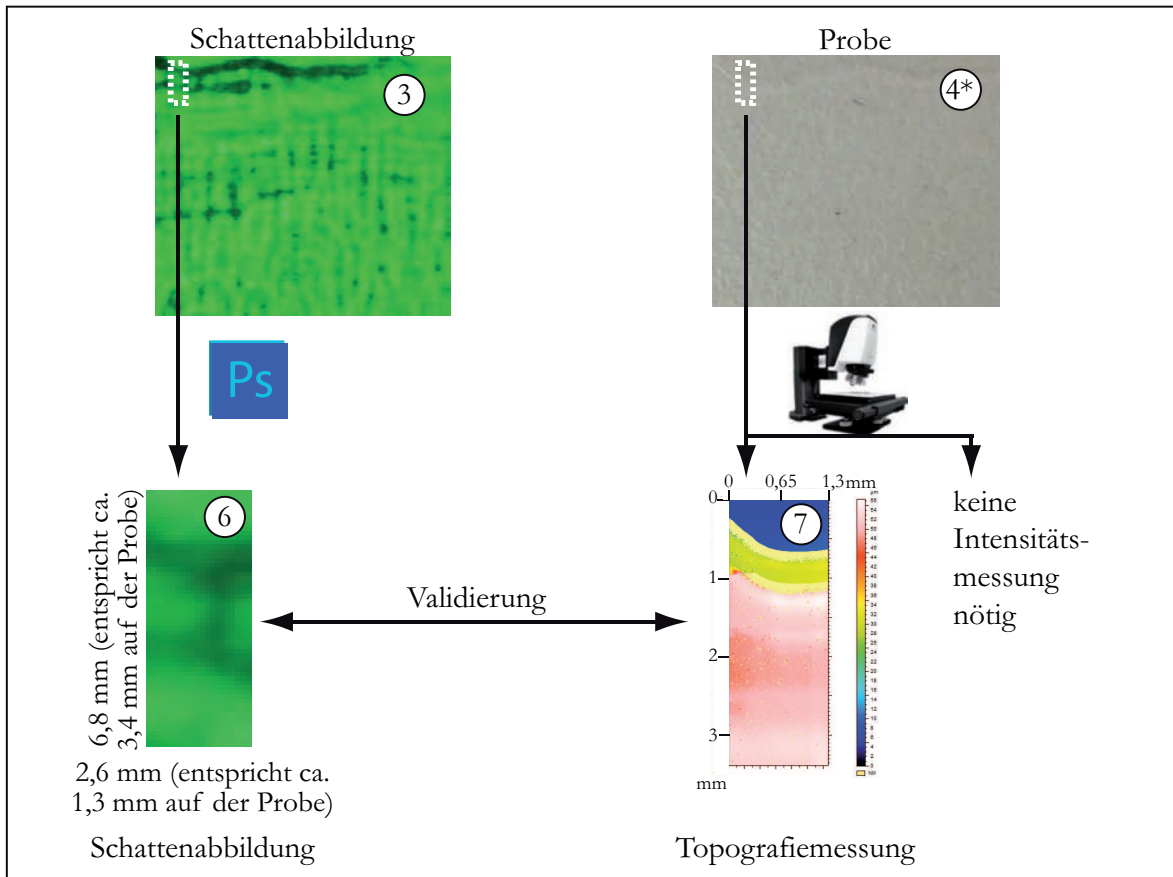


Abbildung 6.3.: Auf der Schattenabbildung (3) und auf der Probe (4\*) wird der weiß markierte Bereich zur Validierung herangezogen. Dieser wird mit Adobe Photoshop ausgeschnitten - dabei entsteht die Schattenabbildung (6) - und weißlichtinterferometrisch vermessen - dabei entstehen die Topografiemessung (7). Eine Intensitätsmessung ist hier nicht mehr nötig.

Der Validierungsbereich wird im Adobe Photoshop aus der Schattenabbildung (3) ausgeschnitten, wodurch die Schattenabbildung (6) entsteht. Derselbe Bereich wird auf der Probe (4\*)<sup>3</sup> weißlichtinterferometrisch vermessen, wodurch die Topografiemessung (7) entsteht. Die dabei entstehende Intensitätsmessung wird hier nicht beachtet, da die Topografiemessung gelungen ist.

Die Gegenüberstellung der Schattenabbildung (6) und der Topografiemessung (7) ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Eine weitere Vergrößerung der Schattenabbildung überschreitet die Auflösung der Aufnahme und verschlechtert die Veranschaulichung. Daher wird der topografisch erfasste Bereich auf der Schattenabbildung mit einem weißen Rechteck markiert. Zusätzlich wird in Abbildung 6.4 das aus der Topografiemessung resultierende Profil gezeigt. Der gezeigte Bereich stammt aus dem Randbereich einer Probe, die im Filmziehen-flach hergestellt wurde. Der typische Randverlauf bei solchen Proben ähnelt einem Wellenlauf am flachen Flussufer, daher werden zur weiteren Beschreibung assoziierte Begriffe verwendet.

Auf der Topografiemessung und auf dem Profil ist der Verlauf der Schicht vom Sub-

<sup>3</sup>Mit Probe (4\*) wird der Bereich auf der Probe (2) bezeichnet, der bei der ersten weißlichtinterferometrischen Messung vermessen wurde und aus dem die Topografiemessung (4) und die Intensitätsmessung (5) entstanden.

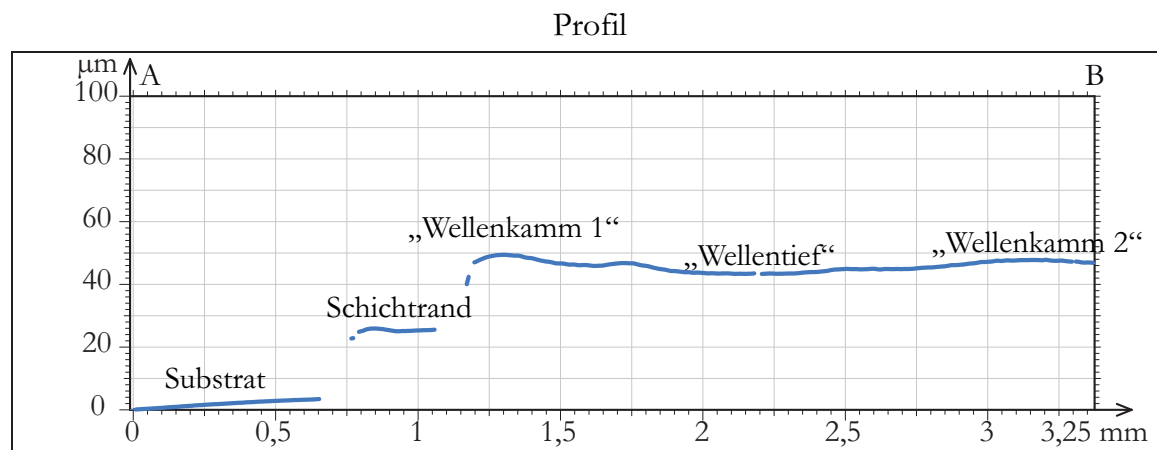
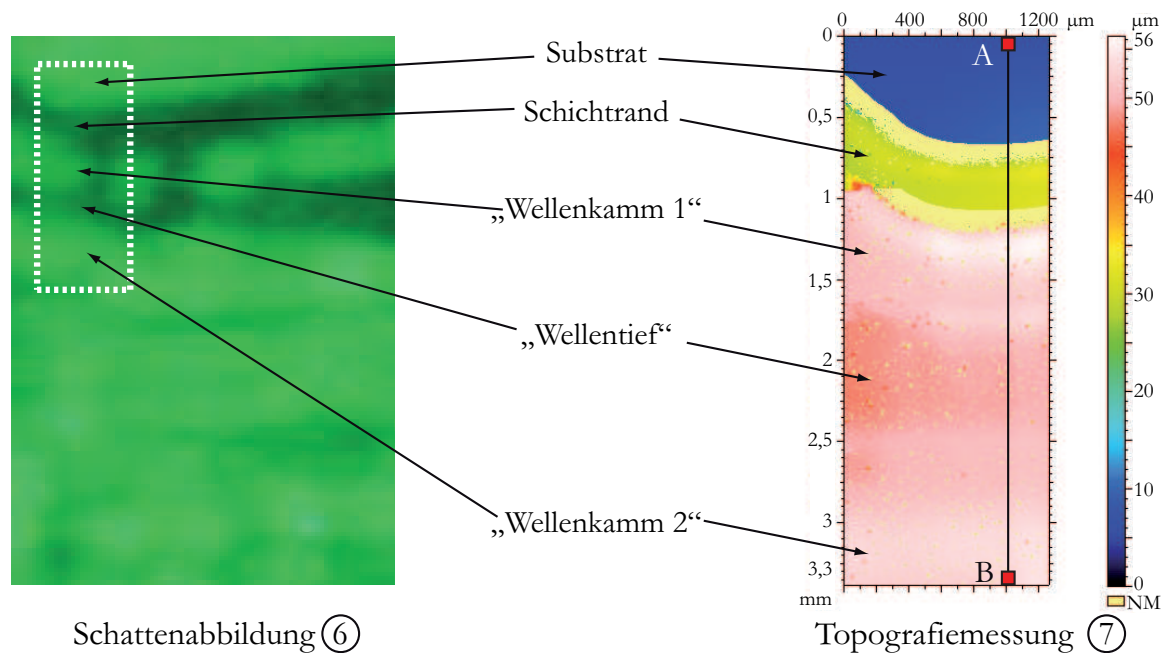


Abbildung 6.4.: Direkter Vergleich der Schattenabbildung (links) und der Topografiemessung (rechts) und des aus der Topografiemessung resultierenden Profils entlang der Linie AB. Eine weitere Vergrößerung der Schattenabbildung überschreitet die Auflösung. Das weiße Rechteck markiert auf der Schattenabbildung den von der Topografiemessung erfassten Bereich. Die Lücken im Profil entsprechen den gelb gefärbten Bereichen (NM, not measured) um den Schichtrand auf der Topografiemessung. Diese wurden von der Messung nicht erfasst.

strat angefangen mit dem dünneren Schichtrand sichtbar. Nach dem Schichtrand folgt ein „Wellenkamm“, also ein Bereich mit gesteigerter Schichtdicke. Danach folgt eine Senkung der Schichtdicke um wenige Mikrometer - ein „Wellentief“, das schließlich von einem weiteren „Wellenkamm“ abgelöst wird. Der gleiche Verlauf lässt sich auf der Schattenabbildung verfolgen. Jeder Übergang von einem zum anderen der genannten Bereiche bedeutet eine Änderung der Schichtdicke, die in einem Schatten resultiert. Hiermit und mit zwei weiteren auf dieselbe Weise durchgeführten Messungen an anderen Proben wird gezeigt, dass die Änderungen der Schichttopografie (Schichtdickenänderungen) anhand der Schattenabbildung detektierbar sind. Es konnte also überprüft werden, dass die Methode auf Basis der Schattenabbildung zur qualitativen



Charakterisierung transparenter Silikonschichten geeignet ist und dass die Theorie mit der Praxis übereinstimmt.

### 6.1.2. Grenzen

Die Aufnahmen der Proben als direkte Schattenabbildungen und die geometrischen Verhältnisse, die im Prüfstand umgesetzt wurden (s. Kapitel 5) ermöglichen laut SCHAR-DIN und SETTLES die höchste Sensitivität der Schattenabbildungen [117, 125], also die maximale Genauigkeit der Schattenabbildung im Bezug auf die Oberflächenmerkmale der Probe. Dennoch stellt sich die Frage, welche Oberflächenmerkmale und -strukturen außerhalb des Erfassungsvermögens der Charakterisierungsmethode liegen. Dies wird im Folgenden diskutiert.

Ob gewisse Merkmale mittels der Schattenabbildung detektierbar sind, hängt von ihrer Größe, Form und Kontrast ab. Wie in Kapitel 3.3.2 besprochen, können Schichtdickenvariationen oder Welligkeiten, sowie andere Schichtinhomogenitäten einer Probe in der ersten Näherung als konvexe oder konkave Linsen betrachtet werden und resultieren in Schattenabbildungen unterschiedlicher Intensität bei der gegebenen geometrischen Anordnung des Prüfstands.

Ein Beispiel für Makrostrukturen, die hiermit nicht erfasst werden, ist die Proben- bzw. Substratwelligkeit im Zentimeterbereich. In der vorliegenden Arbeit wurde beschichtete PET-Folie Hostaphan GN 4660 von der Firma MITSUBISHI POLYESTER FILM als Substrat verwendet. Dabei kamen folgende Substratdicken zum Einsatz:

- $96 \pm 4 \mu\text{m}$
- $125 \pm 6 \mu\text{m}$
- $175 \pm 8 \mu\text{m}$ .

Die Toleranzangaben stammen aus dem Produktdatenblatt [85]. Bei der Herstellung der Folie entsteht neben den Schwankungen der Filmdicke ebenfalls eine Welligkeit im Zentimeterbereich<sup>4</sup> [68]. Bei der Herstellung der Silikonschichten werden die Proben (Substrat und Silikon) einer thermischen Behandlung während der Vernetzung ausgesetzt. Die dabei verwendeten Temperaturen überschreiten die Glasübergangstemperatur<sup>5</sup> des PET, die 70 °C beträgt [36]. Bei deren Überschreitung werden Spannungen freigesetzt, die bei der Herstellung der Folien beispielsweise mittels Extrusion<sup>6</sup> entstehen. Dadurch können im Substrat zusätzliche Wellen entstehen, die mit bloßem Auge sichtbar sind.

In Abbildung 6.5 ist eine Schattenabbildung eines Bogens Hostaphan GN4660 (175  $\mu\text{m}$ ) gezeigt. Dieser Bogen wurde drei Minuten lang der Temperatur von 200 °C im Umluft-trockner ausgesetzt und bekam dadurch deutlich sichtbare Wellen, die auf der Schat-

<sup>4</sup>Keine genaueren Angaben seitens des Herstellers vorhanden.

<sup>5</sup>Die Glasübergangstemperatur „ist definiert als mittlere Temperatur des Bereiches, in dem die mikrobrownsche Bewegung der Moleküle von Polymeren bei der Abkühlung einfriert.“ Die mikrobrownsche Bewegung bezeichnet die Bewegung von Kettensegmenten und Seitenketten eines Polymers, ohne dass das Polymer an sich in Bewegung gerät [45].

<sup>6</sup>Mit Extrusion wird ein Herstellungsprozess „eines endlos geformten Kunststoffstranges ausgehend von einem pulver- oder granulatförmigen Kunststoff“ bezeichnet [61]. Der grobe Prozessablauf beinhaltet die Vermischung des pulver- oder granulatförmigen Rohstoffes, seine anschließende starke Erhitzung (über dem Schmelzpunkt), Homogenisierung des Gemisches und seine Extrusion beispielsweise durch eine Düse. Anschließend wird die extrudierte Folie rasch abgekühlt.

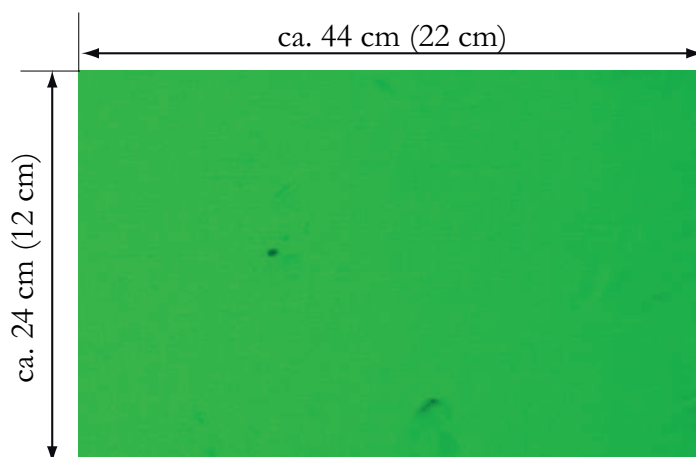


Abbildung 6.5.: Schattenabbildung eines Hostaphan GN4660 175  $\mu\text{m}$  Bogens, der drei Minuten lang einer Temperatur von 200 °C im Umlufttrockner ausgesetzt wurde. Die raren dunklen Flecken sind durch Substratverunreinigung verursacht. Die Welligkeit ist in der Schattenabbildung nicht sichtbar. In Klammern sind die Substratabmessungen angegeben.

tenabbildung nicht sichtbar sind. Ebenso können auch die vom Hersteller angegebenen produktionsbedingten Toleranzen - falls vorhanden - nicht in der Schattenabbildung erkannt werden. Die dunklen Flecken werden durch Verunreinigungen auf dem Substrat verursacht. Dieses Beispiel zeigt, dass großflächige, lateral über mehrere Zentimeter ausgedehnte Schichtdickenvariationen sowie Substrat- oder Probenwellen mit dem vorliegenden Aufbau nicht detektierbar sind <sup>7</sup>.

Weiterhin ist die Detektierbarkeit von feinen Strukturen und Merkmalen durch Schattenabbildungen von Interesse. Um das zu untersuchen wurde eine gegossene und strukturierte Silikonprobe aus Sylgard 184 der Firma DOW CORNING mit der Brechzahl von 1,41 [26] ausgewählt. Die dazugehörige Schattenabbildung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Auf der Schattenabbildung sind die für Giessproben typischen Muster sowie das Strukturierungsmotiv, das einem Turm ähnelt, zu sehen. Rechts in der Abbildung 6.6 ist eine Mikroskopaufnahme des auf der Schattenabbildung weiß umrandeten Bereichs der Probe dargestellt, aufgenommen am Forschungsmikroskop LEICA DM4000M. Die Dicke der Probe (linienfreier Bereich) beträgt 1,7 mm, die strukturierten Linien sind etwa 100  $\mu\text{m}$  breit und ca. 20  $\mu\text{m}$  hoch. In der Mikroskopaufnahme sind Linien- und Wabenstrukturen sichtbar, die auf der Schattenabbildung nicht zu unterscheiden sind. Diese feinen Strukturen verursachen bei einer nahezu senkrechten Anstrahlung eine sehr schwache Ablenkung der aus der Probe austretenden Strahlen, was zu einem sehr geringen Schattenkontrast führt. Die Schatten bei einer geringen Anzahl an Strukturen pro Fläche, wie im Bereich mit zwei einzelnen senkrechten Linien zwischen den Bereichen mit Waben und Querstreifen, werden also vom menschlichen Auge und von der daran angepassten Kameratechnik nicht klar detektiert. Im Falle von Bereichen mit einer höheren Anzahl an Strukturen pro Fläche wird die Wirkung der feinen Schatten durch ihre räumliche Nähe verstärkt (vgl. Bereiche mit Waben und Querstreifen und deren Schattenabbildungen). Die Detektion solcher Bereiche ähnelt der eines geraster-

<sup>7</sup>Für Detektion lateral über mehrere Zentimeter ausgedehnter Merkmale müsste der Aufbau um ein Vielfaches größer sein. Die in dieser Arbeit untersuchten Inhomogenitäten im Mikro- und Millimeterbereich wären mit dem hochskalierten Aufbau nicht mehr detektierbar.

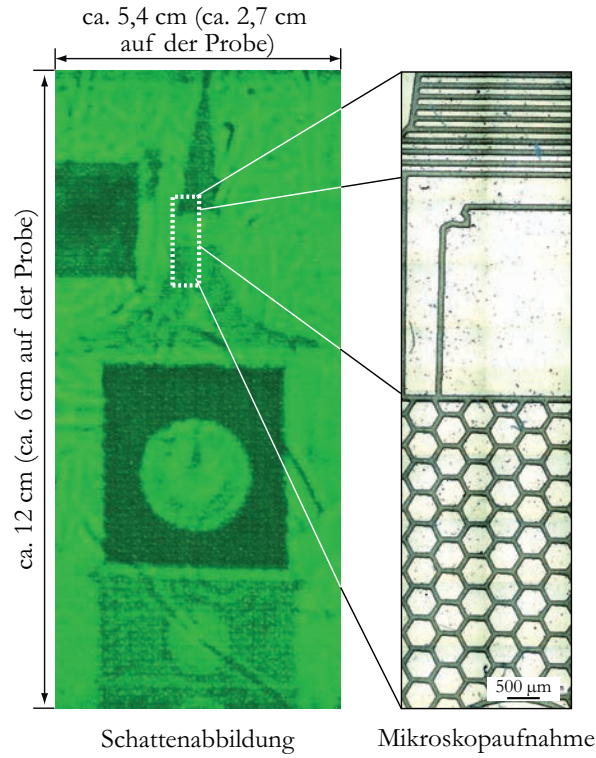


Abbildung 6.6.: Schattenabbildung und Mikroskopaufnahme des mit weißer Kontur markierten Bereichs einer gegossenen und strukturierten Silikonschicht aus Sylgard 184.

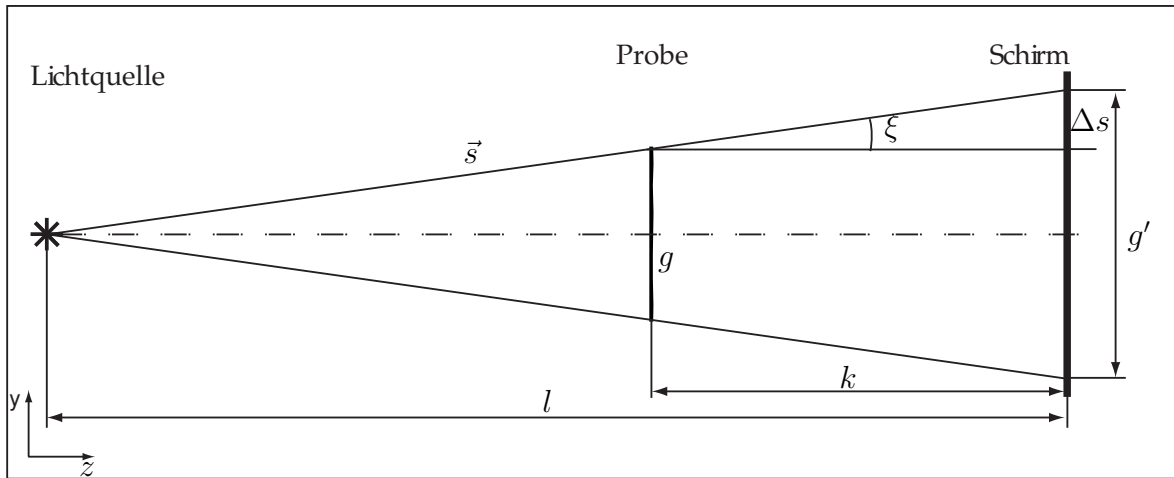


Abbildung 6.7.: Schema der direkten Schattenabbildung nach SETTLES [125]. Der Lichtstrahl  $\vec{s'}$  wird von der Probe um den Winkel  $\xi$  gebrochen. Dadurch verschiebt sich der Punkt, wo er auf den Schirm trifft, um die Auslenkung  $\Delta s$ .  $g$  ist die Größe der Probe,  $g'$  ist die Größe der Schattenabbildung.  $k$  ist der Abstand von Probe zum Schirm,  $l$  ist der Abstand von der Lichtquelle zum Schirm.

ten gedruckten Motivs.

Abbildung 6.7 zeigt die schematische Darstellung der direkten Schattenabbildung nach SETTLES, wobei eine Probe der Größe  $g$  in einer Schattenabbildung der Größe  $g'$  resultiert. Der Lichtstrahl  $\vec{s'}$  wird an der Kante der Probe um den Winkel  $\xi$  gebrochen. Dadurch verschiebt sich der Punkt, wo der Strahl auf den Schirm trifft, um die Aus-

## 6. Diskussion

lenkung  $\Delta s$ .  $k$  und  $l$  sind jeweils die Abstände von der Probe und von der Lichtquelle zum Schirm. Das Auflösungsvermögen eines Schattenabbildungssystems wird von seiner Sensitivität oder Kontrast  $C$  bestimmt (*engl.* sensitivity, contrast) [125]. Dieser ist als Quotient der Auslenkung  $\Delta s$  und der Größe der Schattenabbildung  $g'$  definiert<sup>8</sup>:

$$C = \frac{\Delta s}{g'} \quad (6.1)$$

Aus der geometrischen Anordnung folgt:

$$\tan \xi = \frac{\Delta s}{k} \quad (6.2)$$

und

$$g' = g \frac{l}{l - k} \quad (6.3)$$

Bei der Annahme, dass  $\xi \ll 1$  ist (vgl. Kapitel 3.3.3) gilt:  $\xi \approx \tan \xi$ . Formel 6.2 lässt sich daher folgendermaßen umschreiben:

$$\Delta s = k \cdot \xi \quad | \quad \div g' \quad (6.4)$$

$$\frac{\Delta s}{g'} = \frac{k \cdot \xi}{g'} \quad (6.5)$$

Durch das Zusammenführen der Formeln 6.3 und 6.5 ergibt sich folgende Gleichung:

$$C = \frac{\Delta s}{g'} = \frac{\xi}{g} \cdot \frac{k(l - k)}{l} \quad (6.6)$$

Der zweite Term auf der rechten Seite der Formel 6.6 bleibt innerhalb einer Versuchsserie konstant. Daher wird der Kontrast  $C$  vom Winkel  $\xi$  und der Größe der Probe  $g'$  bestimmt. Dies gilt allerdings nur in sehr vereinfachten Bedingungen [125]. In der Realität verkompliziert sich die Modellierung stark durch den Einfluss mehrerer Parameter, wie der Art der zu untersuchenden Objekte, des Aufbaus des Schattenabbildungssystems, der Aufnahmetechnik (Kamera) usw. Mit weiterer genauerer Modellierung der Vorgänge spezifisch für unterschiedliche reale Objekte und Systeme beschäftigte sich bereits in 1940er Jahren SCHARDIN [117], später WEINBERG und Fox [157, 32] sowie ihre Nachfolger DUNN-RANKIN [28] und PARSINEJAD [97]. Zur Ermittlung des Auflösungsvermögens des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Prüfstands wird auf empirische Mittel zurückgegriffen.

Zur Ermittlung eines genauen Grenzwertes der detektierbaren Strukturgrößen bedarf es weiterer Untersuchungen. Hierfür wurde ein Abguss aus Sylgard 184 von einer Tiefdruckform mit variierenden Linienstrukturen angefertigt. Das Layout der Druckform ist in Abbildung 6.8 dargestellt und beinhaltet 24 Linienelementengruppen, die waagrecht mit Buchstaben A bis H und senkrecht mit Zahlen 1 bis 3 gekennzeichnet sind. Der Abguss ist etwa 1 mm dick, die Strukturen sind ca. 16  $\mu\text{m}$  hoch. Obwohl auf

---

<sup>8</sup>Die genaue Herleitung kann bei SETTLES [125] nachgeschlagen werden.

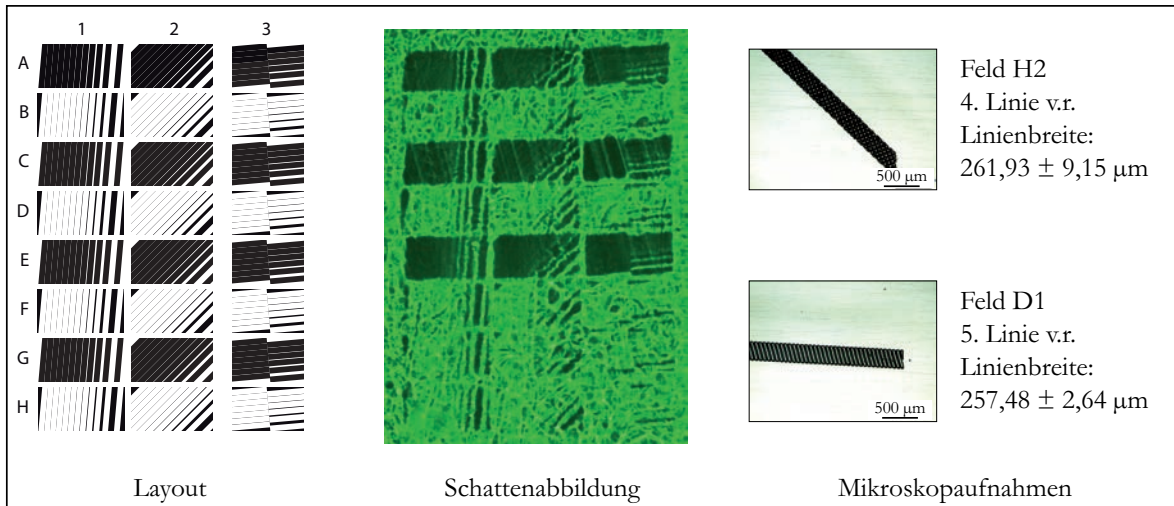


Abbildung 6.8.: Druckformlayout, Schattenabbildung und Mikroskopaufnahmen der gemessenen Linien der Felder H2 und D1 eines Silikonabgusses einer Tiefdruckform.

dem Abguss alle Linienelemente vorhanden sind, hat er eine schlechtere Gussqualität als der zur Abbildung 6.6 gehörende, was in der Schattenabbildung (vgl. Abb. 6.8) anhand der stark ausgeprägten Muster sichtbar ist. Solche Muster können oft am Boden eines Wasserbeckens, z.B. eines Schwimmbades, beobachtet werden. Sie werden durch die Lichtbrechung an der unruhigen Wasseroberfläche verursacht. Hier deuten sie darauf hin, dass die Vernetzung des zähflüssigen Silikons zu schnell nach dem Gießvorgang einsetzte, ohne dass sich das Silikon komplett gleichmäßig auf der Druckformoberfläche verteilen konnte. Die feinsten auf der Schattenabbildung deutlich erkennbaren Elemente entsprechen der vierten Linie von rechts im Feld H2 und der fünften Linie von rechts im Feld D1. Die Linienstärken liegen bei ca.  $260 \mu\text{m}$ . Feinere Elemente des Abgusses können nicht mehr eindeutig und klar erkannt werden.

Bei Betrachtung von Schattenabbildungen unterschiedlicher Proben, entsteht die Frage, ob diese von der Dicke der zu untersuchenden Schicht bzw. Probe abhängen. Um diese Frage zu beantworten, muss auf die geometrische Anordnung des Prüfstands zurückgegriffen werden. Der Prüfstand hat eine Abmessung von 2 m entlang der optischen Achse, das ist der Abstand zwischen der LED und der Leinwand (vgl. Abb. 5.9 auf S. 83). Die Probe befindet sich genau in der Mitte, also betragen die Abstände LED-Probe und Probe-Leinwand jeweils 1 m. Bei der Annahme der Dicke einer zufälligen Probe (Substrat und Schicht) von  $200 \mu\text{m}$ , beträgt die Dicke der Probe 0,01% der Länge des Prüfstands und ist somit vernachlässigbar klein. Damit kann der Einfluss der absoluten Schichtdicke auf die Schattenabbildung vernachlässigt werden. Dies wird in Abbildung 6.9<sup>9</sup> bestätigt, die eine Reihe von Schattenabbildungen von drei Proben (Elastosil PK16, Filmziehen flach) zeigt, deren Schichtdicken von Probe 1 zu Probe

<sup>9</sup>Der Größenunterschied zwischen der Schattenabbildung und der Probe ergibt sich aus der geometrischen Anordnung:  $\frac{g'}{g} = \frac{l}{k(l-k)}$  und beträgt beim vorhandenen Prüfstand zwei (vgl. Abb. 6.7 auf S. 97 und 5.9 auf S. 83). Da unterschiedliche Ausschnitte der Schattenabbildungen im Zuge dieser Arbeit verwendet werden, ist die Benutzung eines Maßstabs bei deren Darstellung in der folgenden Diskussion mit großem Aufwand verbunden und wurde per Hand ausgeführt. Daher sind die Maßstab- und Größenangaben bei den Schattenabbildungen nur bedingt genau. Für zukünftige Anwendungen (z.B. Inline-Messungen) kann es von Vorteil sein, hierfür einen automatisierten Algorithmus zu entwickeln.

## 6. Diskussion

3 kontinuierlich sinken. Die Schichtdicken sind ebenfalls in Abbildung 6.9 angegeben. Bei der Betrachtung der dieser Schattenabbildungen wird ersichtlich, dass diese von unterschiedlichen Proben stammen. Es kann allerdings keine Abhängigkeit der Schattenabbildungen von der Schichtdicke des Silikons, wie z.B. Änderung derer Helligkeit, festgestellt werden. Die Unabhängigkeit der Schattenabbildungen von der Schichtdicke ist nur bei Materialien mit einer sehr hohen Transparenz nahe 100% und bei den für verwendete Druck- und Beschichtungsverfahren typischen Schichtdickenvariationen gegeben.

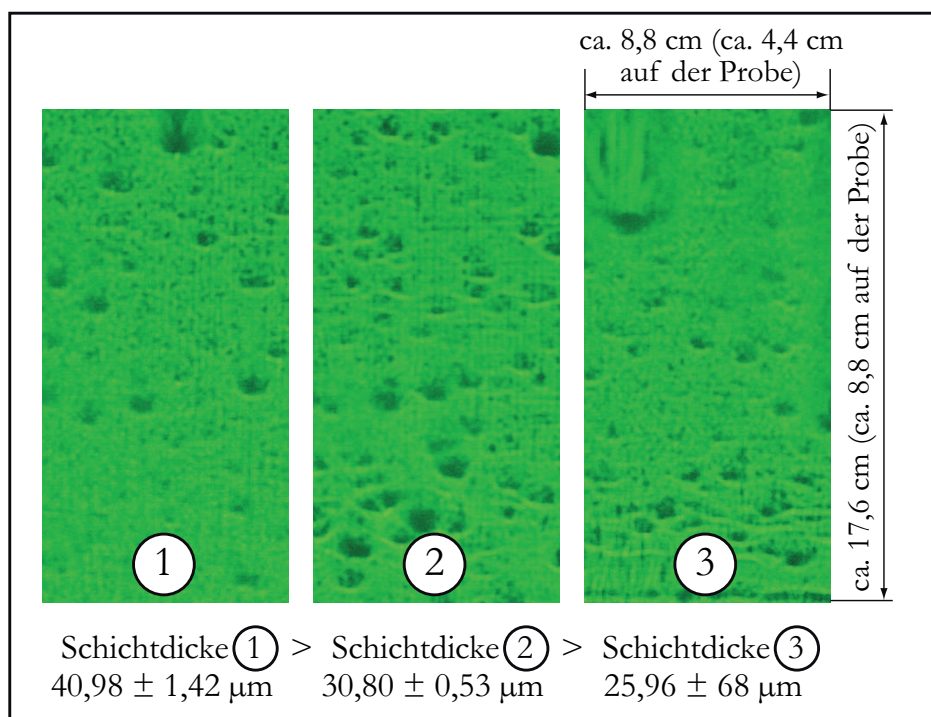


Abbildung 6.9.: Ausschnitte von Schattenabbildungen von drei Proben (Elastosil PK16, Filmziehen, flach) mit unterschiedlichen Schichtdicken. Die Schichtdicken sinken von Probe 1 zu Probe 3 und sind unter den entsprechenden Schattenabbildungen angegeben. Es ist kein qualitativer Unterschied zwischen den Schattenabbildungen der unterschiedlich dicken Schichten zu sehen. Ausschnittsgröße liegt bei ca.  $8,8 \times 17,6 \text{ cm}^2$ , was einem Bereich von ca.  $4,4 \times 8,8 \text{ cm}^2$  auf den Proben entspricht.

Die Untersuchungen der Grenzen des optischen Prüfstands ergaben, dass damit keine Schichtdickenvariationen und Welligkeiten im Zentimeterbereich erfasst werden können. Die feinsten Strukturen, die am Prüfstand detektiert werden können, liegen bei ca.  $260 \text{ μm}$ . Im untersuchten Schichtdickenbereich können die Ergebnisse durch die extrem hohe Transparenz der zu charakterisierenden Schichten als schichtdickenunabhängig betrachtet werden.

### 6.1.3. Übertragbarkeit der Charakterisierungsmethode

Bisher wurde die Charakterisierungsmethode nur in Hinsicht auf Anwendungen für die DEA mit Verwendung von Silikonen und PET-Substraten betrachtet und getestet. Interessant wäre jedoch ihr Einsatz zur Charakterisierung von Proben für weitere



Anwendungen oder für andere Materialien. Im Folgenden werden zwei solche Fälle untersucht.

In der gedruckten Elektronik werden oft Substrate mit ITO-Beschichtung verwendet. ITO ist die englischsprachige Abkürzung für *indium tin oxide* (Indiumzinnoxid). Dies ist ein transparenter Halbleiter mit Brechzahl  $n = 1,9$  [2], die sich stark von der Brechzahl der Silikone ( $n \approx 1,5$ ) unterscheidet. Ein mit ITO beschichtetes Substrat kann beispielsweise die Funktion einer Bodenelektrode bei OLEDs übernehmen [67]. Außerdem haben ITO-Substrate ein Potential zur Verwendung als Bodenelektrode bei DEA. Bei der bisherigen Anwendung in OLEDs liegen die Schichtdicken der auf das ITO-Substrat aufgetragenen Schichten im Submikrometerbereich. Zur Charakterisierung derart dünner Schichten auf ITO-Substraten kann die ICR-Methode von BOR-NEMANN erfolgreich angewendet werden [12]. Die Schichtdicken in DEA-Anwendungen liegen durchschnittlich zwischen 10 und 100  $\mu\text{m}$  und können daher nicht mithilfe der ICR-Methode charakterisiert werden.

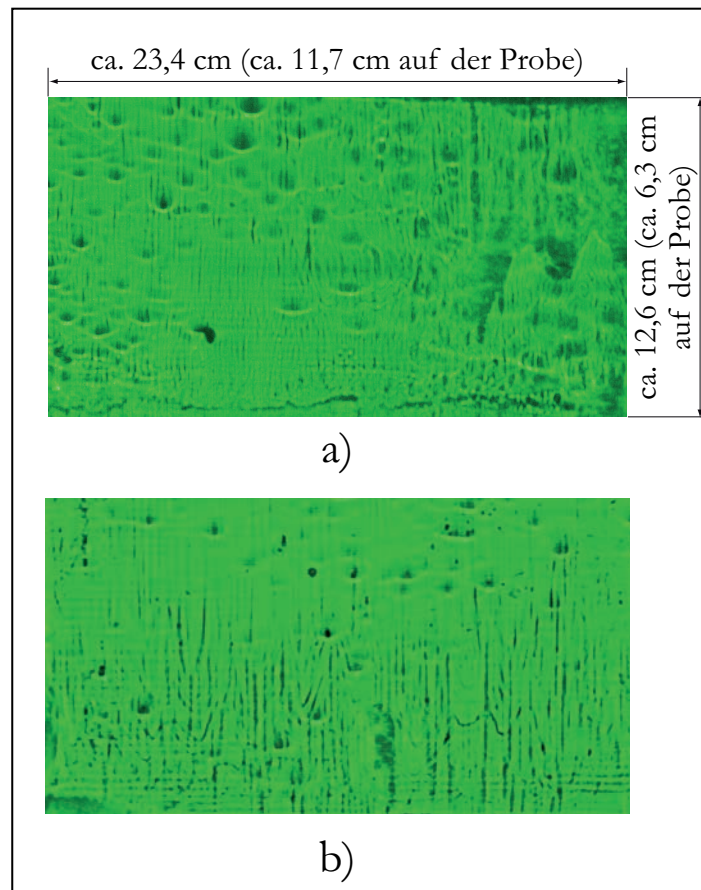


Abbildung 6.10.: Ausschnitte von Schattenabbildungen zweier mittels Filmziehen-flach hergestellten Proben aus WACKER Elastosil P7670 auf a) ITO- und b) Hostaphan-Substrat (PET). Bei den Schattenabbildungen deutet nichts darauf hin, dass die Schichten auf unterschiedliche Substrate aufgebracht wurden. Ausschnittsgröße ca.  $23,4 \times 12,6 \text{ cm}^2$ , was einem Bereich von ca.  $11,7 \times 6,3 \text{ cm}^2$  auf den Proben entspricht.

Die Schattenabbildungsmethode wurde daher auf die Eignung zur Charakterisierung der Silikonschichten auf ITO-Substraten untersucht. Dafür wurden auf  $10 \times 15 \text{ cm}^2$  zu-

geschnittene mit ITO beschichtete PET-Substrate der Dicke  $127\text{ }\mu\text{m}$  (5 mil.) von der Firma SIGMA-ALDRICH verwendet. Diese wurden mit dem Silikon Elastosil P7670 im Filmziehen-flach beschichtet. Eine der dazugehörigen Schattenabbildungen ist neben einer Schattenabbildung einer Probe aus Elastosil P7670 auf Hostaphan-Substrat (PET), ebenfalls Filmziehen-flach, in Abbildung 6.10 dargestellt. Es ist nicht zu unterscheiden, welche Schattenabbildung welcher Probe (ITO- oder PET-Substrat) entstammt. Die Schattenabbildungen weisen typische Merkmale auf, die bei den im Filmziehen-flach hergestellten Proben beobachtet und im nächsten Unterkapitel behandelt werden. In Unterkapitel 6.1.2 „Grenzen der Charakterisierungsmethode“ wurde gezeigt, dass lateral ausgedehnte Variationen der Substratdicke und Substratwelligkeit von der Methode nicht registriert werden. Daher kann ein Substrat, solange es genügend Transparenz aufweist, als *planparallele Platte* (vgl. S. 58) betrachtet werden, die in einer parallelen Verschiebung der Lichtstrahlen resultiert und keine Schatten wirft. Somit stammen die Schatten auf den Schattenabbildungen ausschließlich von den Inhomogenitäten der Silikonschicht, wie auch im Falle der bisher benutzten Hostaphan-Substrate. Die Schattenabbildungsmethode ist somit für Charakterisierung von Schichten auf ITO- oder sonstigen Substraten geeignet.

Ein weiteres untersuchtes Beispiel ist eine im Tiefdruck hergestellte Schicht aus Cytop CTL-809M auf einem Glassubstrat. Der Markenname Cytop des Herstellers AGC CHEMICALS umfasst eine Gruppe von Fluorpolymeren mit einer sehr hohen Transparenz von 95% und einer Brechzahl  $n = 1,34$  [3]. Es kann als Ätzresist, Lichtleiter, Hydrophobiermittel oder wie in diesem Fall als Dielektrikum für einen Transistor benutzt werden. In Abbildung 6.11 ist die Schattenabbildung der Schicht zu sehen. In der Schattenabbildung ist erkennbar, welche Bereiche des Substrats mit der Cytop-Schicht bedeckt sind, in Abbildung 6.11 sind manche Grenzen zwischen bedruckten und unbedruckten Bereichen mit weißen Pfeilen markiert. Schichtinhomogenitäten sind hier allerdings nicht zu sehen, mit der Ausnahme eines Kratzers im rechten unteren Bildquadrant. Die Dicke der Cytop-Schicht beträgt  $352 \pm 134\text{ nm}$  und ist somit viel geringer als die bisher in dieser Arbeit untersuchten Schichten. Die Schichtdickenvariationen liegen also ebenfalls im Submikrometerbereich und rufen daher sehr geringe Ablenkungen der Lichtstrahlen hervor. Dennoch bestätigt die Sichtbarkeit der Schichtländer die generelle Eignung der optischen Methode zur Charakterisierung anderer Materialien als Silikone.

Nachdem die Validierung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten optischen Charakterisierungsmethode und die Untersuchung deren Grenzen abgeschlossen sind, kann die zweite Problemstellung der Arbeit - die Herstellung dünner Silikonschichten mittels Druck- und Beschichtungsverfahren - behandelt werden.

## 6.2. Versuchsergebnisse

In Kapitel 5 wurde die Herstellung von Proben beschrieben, die zur folgenden Auswertung herangezogen werden. Die Proben wurden mit drei unterschiedlichen Verfahren (Filmziehen-flach, Filmziehen-rund und Siebdruck) mit Variierung der jeweiligen Prozessparameter aus vier Silikonen (WACKER Elastosil P7670, PK 16 und RT625, sowie NUSIL CF19-2186) hergestellt. Diese werden im Folgenden anhand ihrer Schattenabbildungen analysiert.



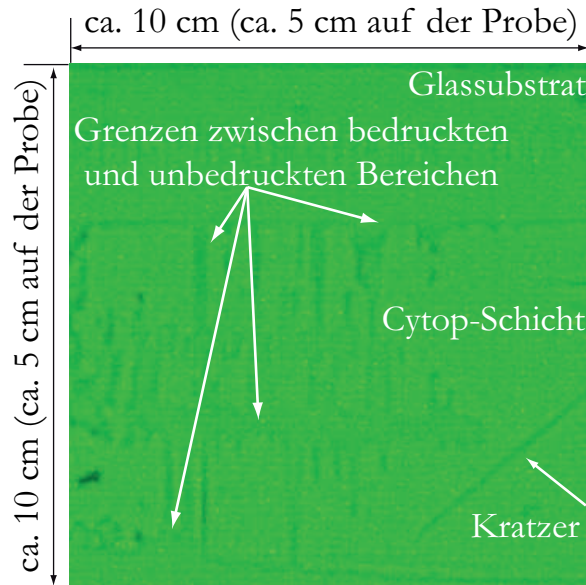


Abbildung 6.11.: Schattenabbildung einer im Tiefdruck hergestellten Schicht aus Cytop CLT-809M auf einem Glassubstrat.

Ein großer Vorteil der in dieser Arbeit entwickelten Methode ist die Möglichkeit der Bildgebung. Bereits in der Entwicklungsphase, in der sich die Methode aktuell noch befindet, ist es möglich, die Schichtinhomogenitäten visuell zu unterscheiden. Somit reicht ein Blick auf die Schattenabbildung einer Probe, um die erste Aussagen über deren Qualität zu treffen. Die auf den Schattenabbildungen sichtbaren Inhomogenitäten lassen sich gut erkennen und formen je nach ihrer Art typische Schattenmuster. Dank dieser Muster ist eine Kategorisierung der Inhomogenitäten möglich. Deren Erkennung kann Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess und seine Parameter geben. Sollte die Methode zukünftig für Inline-Messungen bei industriellen Druck- oder Beschichtungsanlagen zur Prozesskontrolle angewendet werden, können die typischen Inhomogenitäten, deren Schattenabbildungen und die Ursachen der Inhomogenitäten in einer Datenbank zusammengefasst werden. Die Benutzung der Datenbank ermöglicht bei einer rechtzeitigen Erkennung der Inhomogenitäten eine ggf. automatisierte Prozessreglung und/oder eine Aussortierung der fehlerhaften Stellen, wie es bei Inspektionssystemen in der Druck- und Papierbranche üblich ist. Somit könnte im Vergleich zu üblichen Inline-Inspektionssystemen, die direkte Bilder der Druckerzeugnisse liefern, ein neues Inspektionssystem für transparente Schicht-Substrat-Kombinationen eingesetzt werden, das indirekt über Schattenabbildungen eine Prozesskontrolle ermöglicht. Die Kategorisierung der Inhomogenitäten wird im Folgenden behandelt.

### 6.2.1. Kategorisierung von Schichtinhomogenitäten und deren Schattenabbildungen

Bei der Betrachtung der in Kapitel 5.1 hergestellten Proben und deren Schattenabbildungen, können gewisse Regelmäßigkeiten gesichtet werden. Typische sich wiederholende Schattenmuster lassen sich deutlich unterscheiden und weisen auf bestimmte Inhomogenitäten hin. Anhand der typischen Schattenmuster lassen sich drei Inhomogenitätskategorien klar unterscheiden. Diese lassen sich von den in Kapitel 3.1 typischen

## 6. Diskussion

Schichtdefekten ableiten und werden im Folgenden vorgestellt.

**Kategorie 1: Einschlüsse** Die erste Kategorie der Inhomogenitäten stellen die Einschlüsse dar. Damit werden „Fremdkörper“ in oder auf der Silikonschicht bezeichnet. Wenn der Herstellungsprozess nicht in einem Reinraum erfolgt, ist es nahezu unvermeidlich, dass sich kleine Staubkörner und andere mikroskopische Gegenstände ins Materialinnere oder auf die gerade aufgetragene unvernetzte Schicht absetzen. Nach der Vernetzung bleiben diese fest in der Probe. Ein Beispiel dazu ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Abbildung 6.12 a) zeigt eine mikroskopische Aufnahme (aufgenommen mithilfe des Forschungsmikroskops LEICA DM4000M und der dazugehörigen Software Leica Application Suite Version 3.7) eines Staubpartikels in einer Silikonschicht. In Abbildung 6.12 b) ist die Schattenabbildung des Staubpartikels dargestellt. In beiden Abbildungen ist ebenfalls die durch das Absetzen des Staubpartikels auf die nasse Silikonschicht verursachte kreisförmige Schichtdickenänderung sichtbar. Die Schattenabbildung des Einschlusses zeichnet sich durch eine runde Form mit einer hellen Kontur aus.

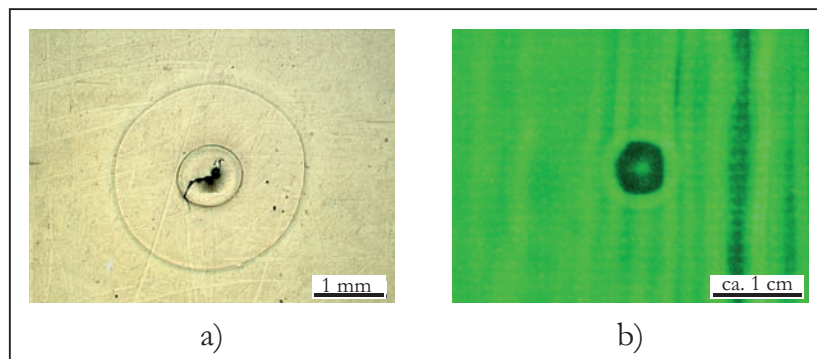


Abbildung 6.12.: Staubpartikel auf einer Silikonschicht. a) Mikroskopische Aufnahme. b) Schattenabbildung.

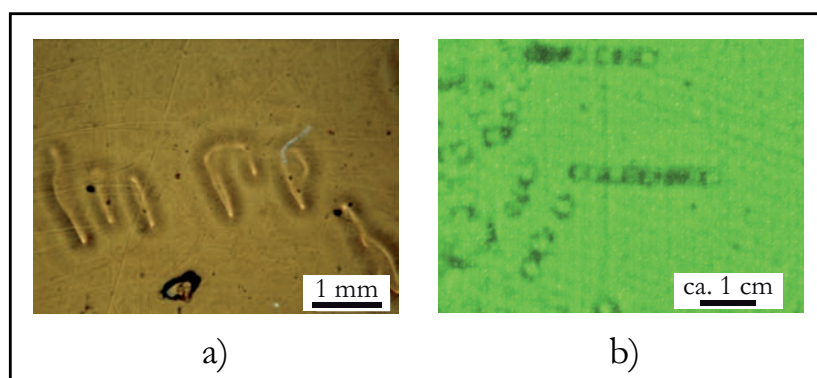


Abbildung 6.13.: Lufteinschlüsse in einer Silikonschicht. a) Mikroskopische Aufnahme. b) Schattenabbildung.

In Abbildung 6.13 sind eine mikroskopische Aufnahme und eine Schattenabbildung von Lufteinschlüssen in einer Silikonschicht gezeigt. Diese können auch zur Kategorie Einschlüsse dazugezählt werden, obwohl an sich kein „Fremdkörper“ aufzufinden ist. Die Schattenabbildungen von Lufteinschlüssen und Staubpartikeln sind unter Umständen

schwer zu unterscheiden. Die Auswirkung, die sie evtl. auf die Schichtperformance haben können, ist allerdings sehr ähnlich (vgl. Kapitel 3.1). Aus diesem Grund werden Luft- und Staubeinschlüsse zur gleichen Kategorie gezählt.

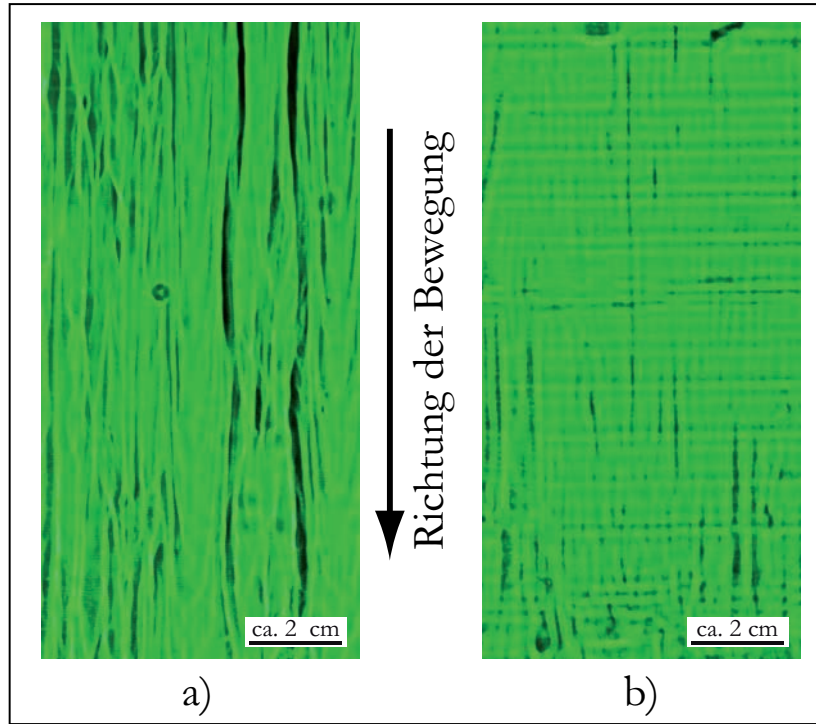


Abbildung 6.14.: Schattenabbildungen von Längs- und Querstreifen bedingt durch die Bewegungsrichtung beim Fluidauftrag. a) Längsstreifen. b) Quer- und Längsstreifen.

**Kategorie 2: Bewegungsrichtungsbedingte Merkmale** Eine weitere Kategorie der Inhomogenitäten äußert sich in Schattenmustern, in denen sich die Beschichtungs- oder Druckrichtung ablesen lässt. Bei den verwendeten Druck- und Beschichtungsvorgängen wird entweder das Substrat oder die Rakel in eine bestimmte Richtung bewegt, um den Fluidauftrag zu vollbringen. Diese Bewegung kann Spuren auf der unvernetzten Silikonschicht hinterlassen. Diese äußern sich meistens in Längsstreifen. Beispielhaft ist dazu eine Schattenabbildung in Abbildung 6.14 a) zu sehen. Manchmal kommen auch Querstreifen senkrecht zur Bewegungsrichtung zustande, wie in Abbildung 6.14 b) dargestellt.

Neben Streifen gehört eine weitere Art der Inhomogenitäten zur zweiten Kategorie. Für diese wurde in der Literatur keine passende Bezeichnung gefunden. Diese Inhomogenität ähnelt den sogenannten „Farbnasen“, die aus Malerarbeiten bekannt sind. Allerdings entstehen die „Farbnasen“ dabei unter dem Einfluss der Schwerkraft an senkrechten Oberflächen. Bei den verwendeten Druck- und Beschichtungsverfahren befindet sich das Substrat allerdings in waagrechter Lage. Der Ursprung der Inhomogenitäten muss also andere Gründe haben. Auf den Schattenabbildungen sind dabei schlieren<sup>10</sup>,

<sup>10</sup>Nicht zu verwechseln mit den Schlieren im optischen Schlierenverfahren. Zur Unterscheidung kann hier der englische Begriff „*streaks*“ (Streifen, Strähnen) verwendet werden. Für die Beschreibung des optischen Verfahrens wird das Wort „Schlieren“ im Englischen ohne Übersetzung eingesetzt.

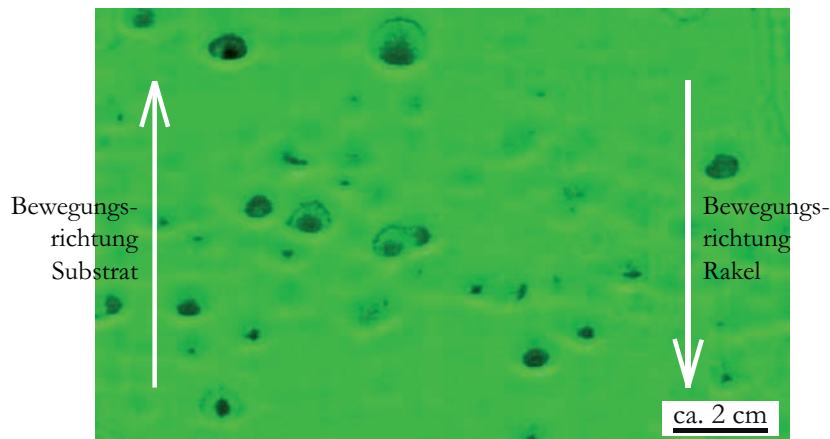


Abbildung 6.15.: Schattenabbildung von tropfen- oder schlierenähnlichen Inhomogenitäten auf einer Filmziehen-flach-Probe. Der Pfeil jeweils gibt die Bewegungsrichtung der Rakel bei Filmziehen-flach und Siebdruck und die Bewegungsrichtung des Substrats beim Filmziehen-Rund an.

klumpen- oder tropfenförmige Schatten zu beobachten (Abb. 6.15). Diese Schattenmuster haben eine leicht ausgedehnte runde Form mit einer hellen Umrandung an der Seite entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung im Falle vom Filmziehen-rund und in Bewegungsrichtung im Falle Siebdruck und Filmziehen-flach.

Die zur Kategorie 2 gehörenden Inhomogenitäten äußern sich in Schwankungen der Schichtdicke und üben einen negativen Einfluss auf die Performance der Schicht aus.

**Kategorie 3: Oberflächenmakromuster** Zur letzten Inhomogenitätenkategorie, die sich klar aus den Schattenabbildungen herauslesen lässt, gehören die Makromuster, die lateral im Zentimeterbereich liegen. Ein solcher Fall ist die in Kapitel 5.1 erwähnte statische Aufladung, die in großen stern- und blumenförmigen Mustern auf der Silikonoberfläche resultiert. Diese Muster sind auf den Schattenabbildungen leicht zu erkennen. Abbildung 6.16 zeigt ein solches Muster als kontrastverstärktes Foto und als Schattenabbildung.

Ein weiteres klar erkennbares Beispiel der Makromuster ist das Rautenmuster auf den Proben, die im Filmziehen-rund hergestellt wurden (Abb. 6.17). Der Ursprung dieser Muster ist unklar und wird vermutlich durch eines der Konstruktionsteile der Filmzieh-anlage verursacht. Allgemein führen die beschriebenen Makromuster ebenfalls zu Schichtdickenschwankungen. Deren Auswirkung auf die Performance der Schicht hängt von der Dicke der Schicht in  $z$ -Richtung ab.

### 6.2.2. Visuelle Abmusterung der Schattenabbildungen und der Homogenitätswert als Auswertungswerkzeuge

In Kapitel 5.3 wurde der Homogenitätswert  $H$  definiert (vgl. Formel 5.1 auf S. 86). Dieser gibt eine Aussage über die mittlere Schichthomogenität einer Probe anhand der Graustufenwerte GSW der Schattenabbildung. Die Art der Inhomogenitäten wird vom Homogenitätswert  $H$  nicht berücksichtigt. Um die Art der Inhomogenitäten in die Auswertung der Versuchsergebnisse miteinzubeziehen, wurde eine Probandenstudie

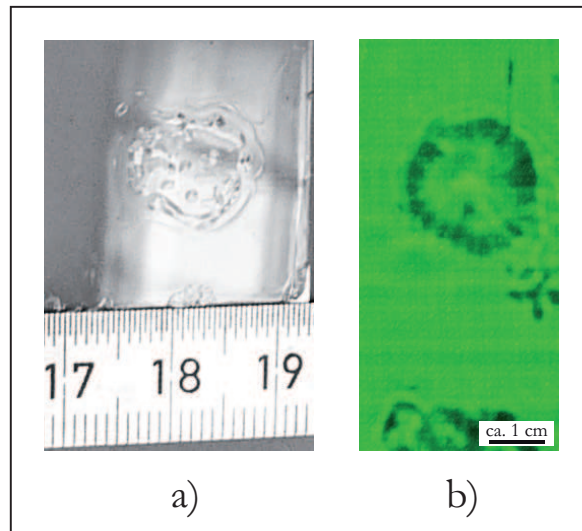


Abbildung 6.16.: Ein durch elektrostatische Aufladung bedingtes Muster. a) Kontrastverstärkte Fotoaufnahme. b) Schattenabbildung.

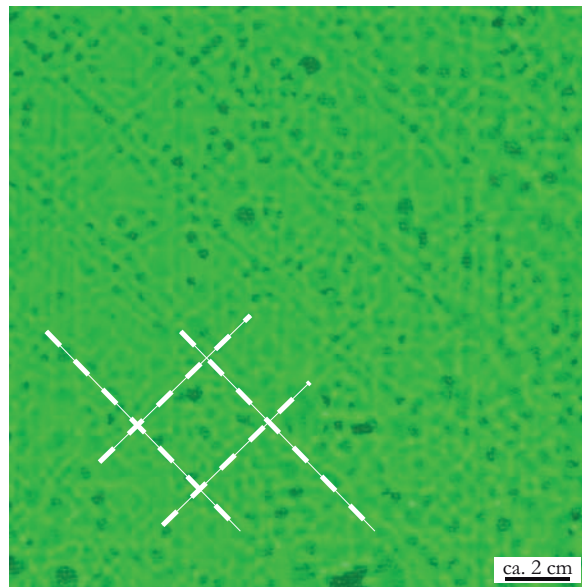


Abbildung 6.17.: Rautenmuster an einer Schicht, hergestellt mittels Filmziehen-rund. Das Muster ist zur Veranschaulichung mit weißen gestrichelten Linien markiert.

durchgeführt, die als Ziel eine Bewertung der Qualität der hergestellten Silikonschichten anhand ihrer Schattenabbildungen hatte.

An der Probandenstudie nahmen drei erfahrene Drucktechniker bzw. -ingenieure teil. Wie bereits erwähnt, ist die visuelle Abmusterung der Druckerzeugnisse in der Druckindustrie durchaus üblich. Alle drei an der Probandenstudie partizipierenden Drucktechniker besitzen eine jahrelange Erfahrung im graphischen und funktionalen Druck. Sehschwächen der Probanden - falls vorhanden - wurden durch Sehhilfen (Brille, Kontaktlinsen) ausgeglichen. Die Abmusterung der ausgedruckten Schattenabbildungen fand beim Tageslicht an einem sonnigen Mittag in einem hell gestrichenen Raum in der direkten Fensternähe statt. Die Probanden werteten die Schattenabbildungen aller 78 Proben, deren Herstellung in Kapitel 5 beschrieben wurde. Für die maximale Objekti-



vität der Abmusterung wussten die Probanden nicht, wie die Proben, die die jeweiligen Schattenabbildungen erzeugten, hergestellt wurden. Vor dem Beginn der visuellen Abmusterung, die die Probanden unabhängig voneinander durchführten, bekamen sie eine Einweisung über die Kategorien der Inhomogenitäten, die in Kapitel 6.2.1 dargestellt wurden. Die Aufgabe der visuellen Abmusterung war, jede der 78 Schattenabbildungen bezüglich der einzelnen Kategorien der Inhomogenitäten und bezüglich des Gesamteindrucks zu bewerten (insgesamt vier Bewertungen je Probe). Zur Bewertung wurde folgende Benotung verwendet:

- 1: gut / Inhomogenitätenkategorie nicht oder kaum vorhanden;
- 2: mittel / Inhomogenitätenkategorie vermehrt vorhanden;
- 3: schlecht / Inhomogenitätenkategorie stark ausgeprägt.

Die über die Probandenzahl gemittelten Bewertungen der Inhomogenitätskategorien 1 bis 3 sowie die dazugehörigen Standardabweichungen  $\sigma$  für alle Proben sind im Anhang C aufgelistet.

Die Bewertung des Gesamteindrucks einer Schattenabbildung, im Folgenden *Gesamt-note* genannt, kann zur Überprüfung des Homogenitätswertes  $H$  herangezogen werden. Bei der Suche nach einem Zusammenhang zwischen der Bewertung und dem Homogenitätswert muss beachtet werden, dass die menschliche visuelle Wahrnehmung logarithmisch ist und durch das Weber-Fechner-Gesetz beschrieben wird. Zusätzliche Informationen hierzu sind bei KUNERT und MÖSER zu finden [72, 87]. Daher werden die Werte des Homogenitätswerts  $H$  im Folgenden in der logarithmischen Form  $\ln H$  verwendet.

Um festzustellen, ob zwischen zwei Variablen eine Korrelation besteht, wird in der Statistik der Korrelationskoeffizient  $\hat{\rho}$  verwendet [46, 49]. Der Korrelationskoeffizient  $\hat{\rho}$  zweier Zufallsgrößen  $X$  und  $Y$  ist durch ihre Kovarianz<sup>11</sup>  $\text{Cov}(X, Y)$  und die Standardabweichungen  $\sigma$  definiert [46]:

$$\hat{\rho} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (6.7)$$

Der Korrelationskoeffizient  $\hat{\rho}$  kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei der Betrag des Korrelationskoeffizienten  $|\hat{\rho}| = 1$  eine vollständige und  $\hat{\rho} = 0$  eine vernachlässigbare Korrelation der Größen  $X$  und  $Y$  ergibt. Im Falle der Bewertung des Gesamteindrucks und  $\ln H$  über sämtliche Proben ergibt sich ein Korrelationskoeffizient  $\hat{\rho}$  von 0,54, der auf eine merkliche lineare Korrelation beider Größen hindeutet. Das bedeutet, dass der zwischen der Gesamtbewertung und dem natürlichen Logarithmus des Homogenitätswerts  $H$  bestehende Zusammenhang durchaus komplizierter sein kann, als vorhin angenommen. Abbildung 6.18 stellt die  $\ln H$ -Werte aufgetragen über den Gesamtnoten (Punkte) und die Regressionsgerade beider Größen (Linie) dar. Die Regressionsanalyse sowie die Grafik wurden in Matlab anhand der Open Curve Fitting App `cftool` der Curve Fitting Toolbox erstellt.

Anhand der genannten Werte - die kategoriebezogene und gesamte Bewertung sowie die logarithmische Form des Homogenitätswerts  $\ln H$  - werden im Folgenden die Ergebnis-

---

<sup>11</sup>Kovarianz ist der Erwartungswert  $E$  des Produkts der Abweichungen der einzelnen Komponenten  $X$  und  $Y$  von ihrem jeweiligen Erwartungswert  $E(X)$  und  $E(Y)$ :  $\text{Cov}(X, Y) = E[(X - E(X))(Y - E(Y))]$  [120]

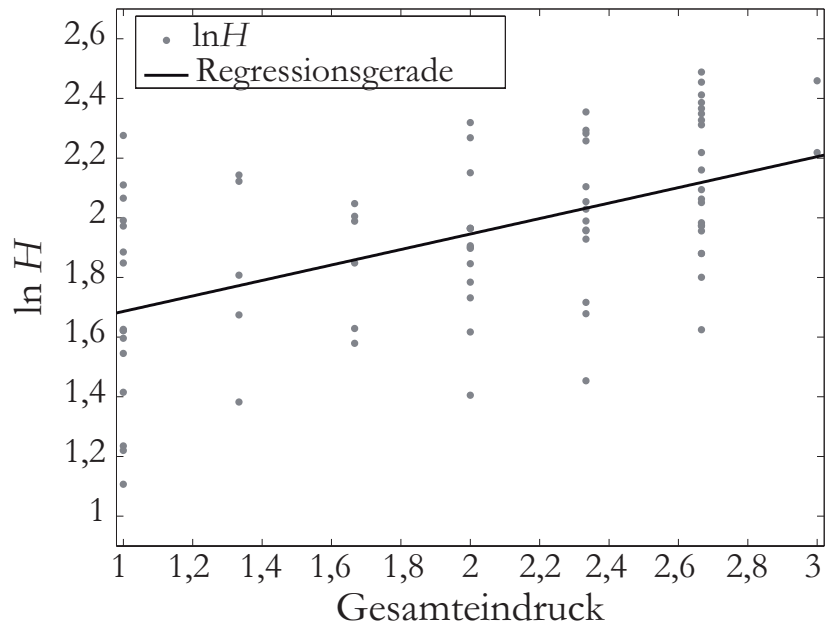


Abbildung 6.18.:  $\ln H$ -Werte aufgetragen über den Werten des Gesamteindrucks aus Anhang C (Punkte) und Regressionsgerade (Linie).

se diskutiert, die aus den verwendeten Herstellungsverfahren und Silikonen resultieren.

### 6.2.3. Versuchsergebnisse und deren Diskussion anhand der visuellen Abmusterung und des Homogenitätswerts

Für die nachfolgende Analyse und Vergleich der Ergebnisse werden Abkürzungen zur Bezeichnung der Proben verwendet, diese sind Tabelle 6.1 zu entnehmen. So wird beispielsweise die Bezeichnung FZF-PK16-50 für eine Probe aus WACKER Elastosil PK 16 verwendet, die im Filmziehen-flach mit einer Rakelgeschwindigkeit von 50 mm/s hergestellt wurde.

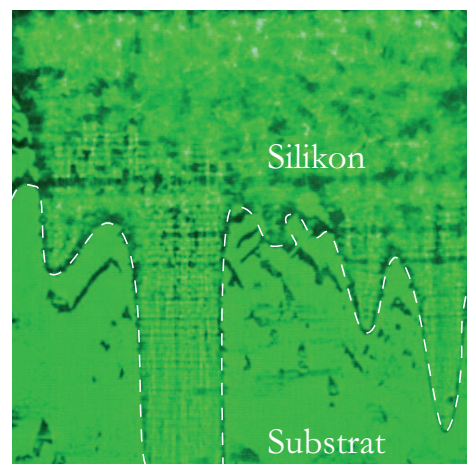


Abbildung 6.19.: Schattenabbildung einer FZF-CF19-50 Probe mit unvollständiger Abdeckung des Substrats mit dem Silikon. Zur Veranschaulichung ist die Grenze zwischen Silikon und Substrat mit der gestrichelten Linie markiert.

Tabelle 6.1.: Abkürzungen zur Probenbezeichnung.

Abkürzung	Bedeutung
Herstellungsverfahren	
FZF	Filmziehen-flach
FZR	Filmziehen-rund
SD	Siebdruck
Materialien	
P7670	WACKER Elastosil P7670
PK16	WACKER Elastosil PK 16
RT625	WACKER Elastosil RT625
CF19	NU SIL CF19-2186
Prozessparameter	
50	Rakelgeschwindigkeit 50 mm/s
100	Rakelgeschwindigkeit 100 mm/s
150	Rakelgeschwindigkeit 150 mm/s
fein	feines Sieb
grob	grobes Sieb

Wie erwähnt, beinhaltet die Probenauswahl jeweils drei bis vier Proben jeder Kombination Verfahren-Silikon-Prozessparameter. In der nachfolgenden Auswertung werden allerdings die Proben aus NUSIL CF 19-2186, hergestellt im Filmziehen-flach, nicht berücksichtigt. Der Grund dafür ist die hohe dynamische Viskosität (vgl. S. 36) des Silikons, die eine vollständige Abdeckung des Substrats im Beschichtungsvorgang verhinderte. In Abbildung 6.19 ist die Schattenabbildung einer solchen Probe dargestellt, die die unvollständige Abdeckung anschaulich macht.

Nach der Definition der drei Kategorien von Inhomogenitäten in Kapitel 6.2.1 und der darauf spezifizierten Aufgabenstellung der Probandenstudie in Kapitel 6.2.2 wird die Auswertung der Versuchsergebnisse anhand der Bewertungen innerhalb der Kategorien durchgeführt. Im Folgenden werden die Proben hinsichtlich der Auswirkungen des verwendeten Silikons, des Herstellungsverfahrens und der Prozessparameter auf die Kategorien der Inhomogenitäten analysiert.

**Kategorie 1: Einschlüsse.** Kategorie 1 behandelt die Anwesenheit und die Ausprägung von Schmutzpartikeln und Luftblasen oder -spuren in den Silikonschichten. In Tabelle 6.2 sind die Bewertungen<sup>12</sup> aus der Probandenstudie dargestellt, die jeweils über die Kombination „Silikon-Herstellungsverfahren-Prozessparameter“ gemittelt sind. Die Bewertungen aller Proben der Kategorie 1 (Kreise) inklusive der Standardabweichungen (graue Balken), sowie die über die Parameterkombinationen gemittelten Bewertungen (grüne Dreiecke) und die dazugehörigen Standardabweichungen (grüne Balken) sind in Abbildung 6.20 dargestellt.

Bei der Betrachtung der Bewertung im Bezug auf die Herstellungsverfahren wird er-

<sup>12</sup>mittlere Bewertungsnote der drei Probanden.



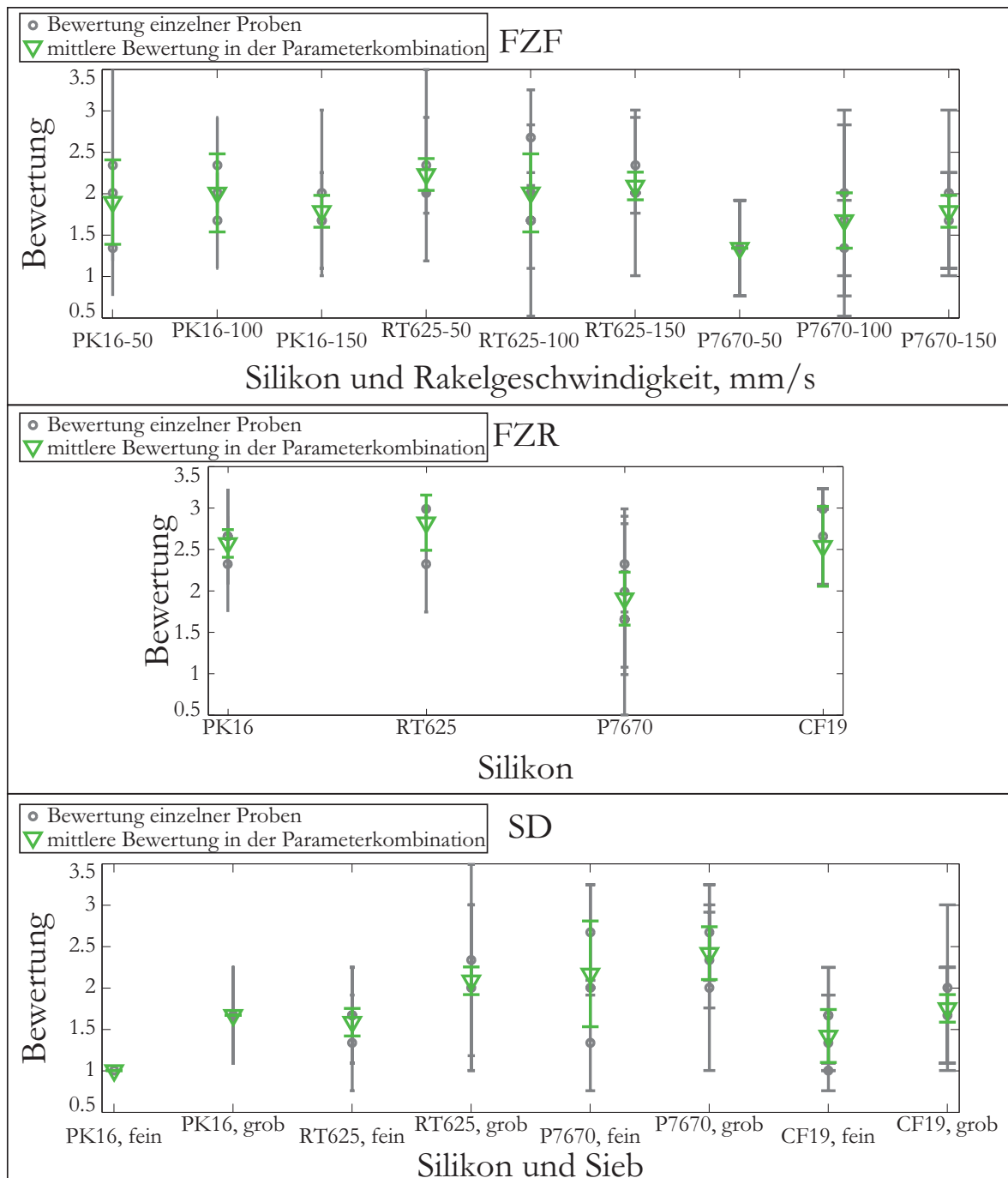


Abbildung 6.20.: Bewertungen zur Kategorie 1: Einschlüsse, gruppiert über die Herstellungsverfahren FZF, FZR und SD, für die verwendeten Silikone und die variierten Prozessparameter.

Tabelle 6.2.: Bewertungen zur Kategorie 1: Einschlüsse.

FZF		FZR		SD	
Bezeichnung der Proben	Bewertung	Bezeichnung der Proben	Bewertung	Bezeichnung der Proben	Bewertung
PK16-50	$1,89 \pm 0,51$	PK16	$2,58 \pm 0,17$	PK16-fein	$1,00 \pm 0,00$
PK16-100	$2,00 \pm 0,47$	RT625	$2,83 \pm 0,33$	PK16-grob	$1,67 \pm 0,00$
PK16-150	$1,78 \pm 0,19$	P7670	$1,92 \pm 0,32$	RT625-fein	$1,58 \pm 0,17$
RT625-50	$2,22 \pm 0,19$	CF19	$2,55 \pm 0,48$	RT625-grob	$2,08 \pm 0,17$
RT625-100	$2,00 \pm 0,47$			P7670-fein	$2,17 \pm 0,64$
RT625-150	$2,08 \pm 0,17$			P7670-grob	$2,42 \pm 0,32$
P7670-50	$1,33 \pm 0,00$			CF19-fein	$1,42 \pm 0,32$
P7670-100	$1,67 \pm 0,33$			CF19-grob	$1,75 \pm 0,17$
P7670-150	$1,78 \pm 0,19$				

sichtlich, dass Filmziehen-rund deutlich schlechter abschneidet, als Filmziehen-flach und der Siebdruck, die ähnliche Bewertungen haben (vgl. Tabelle 6.2). Filmziehen-rund wird aufgrund von vielen Schmutzpartikeln schlechter bewertet als die anderen Verfahren. Ob diese durch das Verfahren an sich verursacht wurden, ist an dieser Stelle schwer zu beurteilen. Naheliegend ist jedoch die Erklärung durch die Standorte der drei Anlagen, die zur Probenherstellung verwendet wurden. Keine davon befindet sich in einem Reinraum, was einen allgemein hohen Anteil an Schmutzpartikeln in der Luft erklärt. Die Siebdruckmaschine und das Filmziehgerät (Filmziehen-flach) befinden sich im selben Raum.

Beim Filmziehen-flach lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Ausprägungsgrad der Kategorie 1 und der Rakelgeschwindigkeit feststellen. Im Siebdruck ist stets eine leichte Verschlechterung beim Siebwechsel von fein auf grob zu sehen. Der Grund dafür kann der Anstieg der Maschenweite beim großen Sieb sein. Eine ungefähre Berechnung ausgehend aus den Angaben zur Fadenanzahl pro Zentimeter und der Fadenstärke (vgl. S. 75) ergibt eine Maschenweite von ca.  $37 \mu\text{m}$  beim feinen und ca.  $100 \mu\text{m}$  beim groben Sieb. Durch die geringe Maschenweite können größere Partikel im Druckvorgang das feine Sieb nicht passieren. Das grobe Sieb lässt dementsprechend größere Partikel durch.

Der Einfluss der verwendeten Silikone auf die Anwesenheit der Einschlüsse ist nicht stark ausgeprägt mit Ausnahme vom Elastosil RT625. Der Grund dafür ist das von anderen Silikonen abweichende Mischungsverhältnis der Komponenten A und B von 9:1 (bei anderen verwendeten Silikonen 1:1). Für die Dosierung in diesem Mischungsverhältnis stand keine Ausrüstung zur Verfügung. Die Komponenten A und B wurden daher manuell in einer Schale vermischt, entgast und zur Dosierung umgefüllt. Durch die große Oberfläche des flüssigen Silikons in der Schale (ca.  $13 \text{ cm}^2$ ) konnte eine hohe Anzahl an Schmutzpartikeln aus der Umgebungsluft auf das Silikon gelangen.

**Kategorie 2: Bewegungsrichtungsbedingte Merkmale.** Zur Kategorie 2 gehören die Schichtinhomogenitäten, die durch die prozessbedingte Bewegung des Substrats

oder des Druck- bzw. Beschichtungsapparats relativ zu einander zustandekommen. Die über die Kombination „Silikon-Herstellungsverfahren-Prozessparameter“ gemittelten Bewertungen aus der Probandenstudie sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Die Bewertung aller Proben, sowie die gemittelten Bewertungen inklusive der Standardabweichungen in der Kategorie 2 sind in Abbildung 6.21 grafisch dargestellt.

Tabelle 6.3.: Bewertungen zur Kategorie 2: Bewegungsrichtungsbedigte Merkmale.

FZF		FZR		SD	
Bezeichnung der Proben	Bewertung	Bezeichnung der Proben	Bewertung	Bezeichnung der Proben	Bewertung
PK16-50	$2,11 \pm 0,38$	PK16	$1,67 \pm 0,00$	PK16-fein	$1,00 \pm 0,00$
PK16-100	$2,00 \pm 0,00$	RT625	$1,42 \pm 0,17$	PK16-grob	$1,25 \pm 0,17$
PK16-150	$2,33 \pm 0,33$	P7670	$3,00 \pm 0,00$	RT625-fein	$1,08 \pm 0,17$
RT625-50	$2,56 \pm 0,38$	CF19	$2,12 \pm 0,66$	RT625-grob	$1,00 \pm 0,00$
RT625-100	$1,75 \pm 0,32$			P7670-fein	$1,25 \pm 0,17$
RT625-150	$2,00 \pm 0,47$			P7670-grob	$1,08 \pm 0,17$
P7670-50	$2,08 \pm 0,42$			CF19-fein	$1,25 \pm 0,32$
P7670-100	$2,00 \pm 0,33$			CF19-grob	$1,00 \pm 0,00$
P7670-150	$2,33 \pm 0,33$				

Beim Vergleich der Herstellungsverfahren hinsichtlich ihres Einflusses auf diese Kategorie der Inhomogenitäten sticht der Siebdruck (SD) mit seiner sehr guten Bewertung im Vergleich zu beiden Varianten des Filmziehens heraus. Der Grund dafür ist das Arbeitsprinzip des Siebdrucks. Vor dem Druckvorgang wird das Druckfluid auf dem Sieb verteilt<sup>13</sup>. Anschließend wird das Druckfluid (Silikon) durch das Sieb auf das Substrat gedrückt. Es gelangt von oben auf das Substrat. Die Richtung der Rakelbewegung ist somit irrelevant.

Bei beiden verwendeten Variationen des Filmziehens erfolgt eine Bewegung des Substrats oder der Rakel in eine bestimmte Richtung. Dazwischen befindet sich das aufzutragende Silikon. Die Spuren der Bewegung werden also unweigerlich in die nasse hochviskose Silikonschicht eingebracht. Dieser negative Effekt könnte vermieden werden, indem Silikone mit einer sehr langen Topfzeit verwendet werden. Bei einer zeitlich versetzten Vernetzung der Schicht, hätte das Fluid die Möglichkeit zum Leveling, also einer Einebnung der Oberfläche. Diese Wartezeit wäre allerdings für schnelle, automatisierte Produktionsprozesse nachteilig. Ein Zusammenhang zwischen den variierten Rakelgeschwindigkeiten und der Stärke der bewegungsbedingten Inhomogenitäten ist nicht festzustellen.

Ein Zusammenhang zwischen den verwendeten Silikonen und der Ausprägung der Inhomogenitäten der Kategorie 2 kann im Filmziehen-flach und im Siebdruck nicht beobachtet werden. Im Filmziehen-rund schneiden die Schichten aus NuSIL CF-19 2186 und Elastosil P7670 schlechter als die anderen zwei Silikone ab. Diese zwei Silikone haben die kürzesten Topfzeiten (s. Anhang B). Dies bedeutet, dass nach der Vermischung der Komponenten A und B sehr schnell (binnen 1-2 Minuten) die ersten Anzeichen

<sup>13</sup>Im grafischen Druck wird dieser Vorgang „das Sieb wird eingefärbt“ bzw. „geflutet“ genannt.

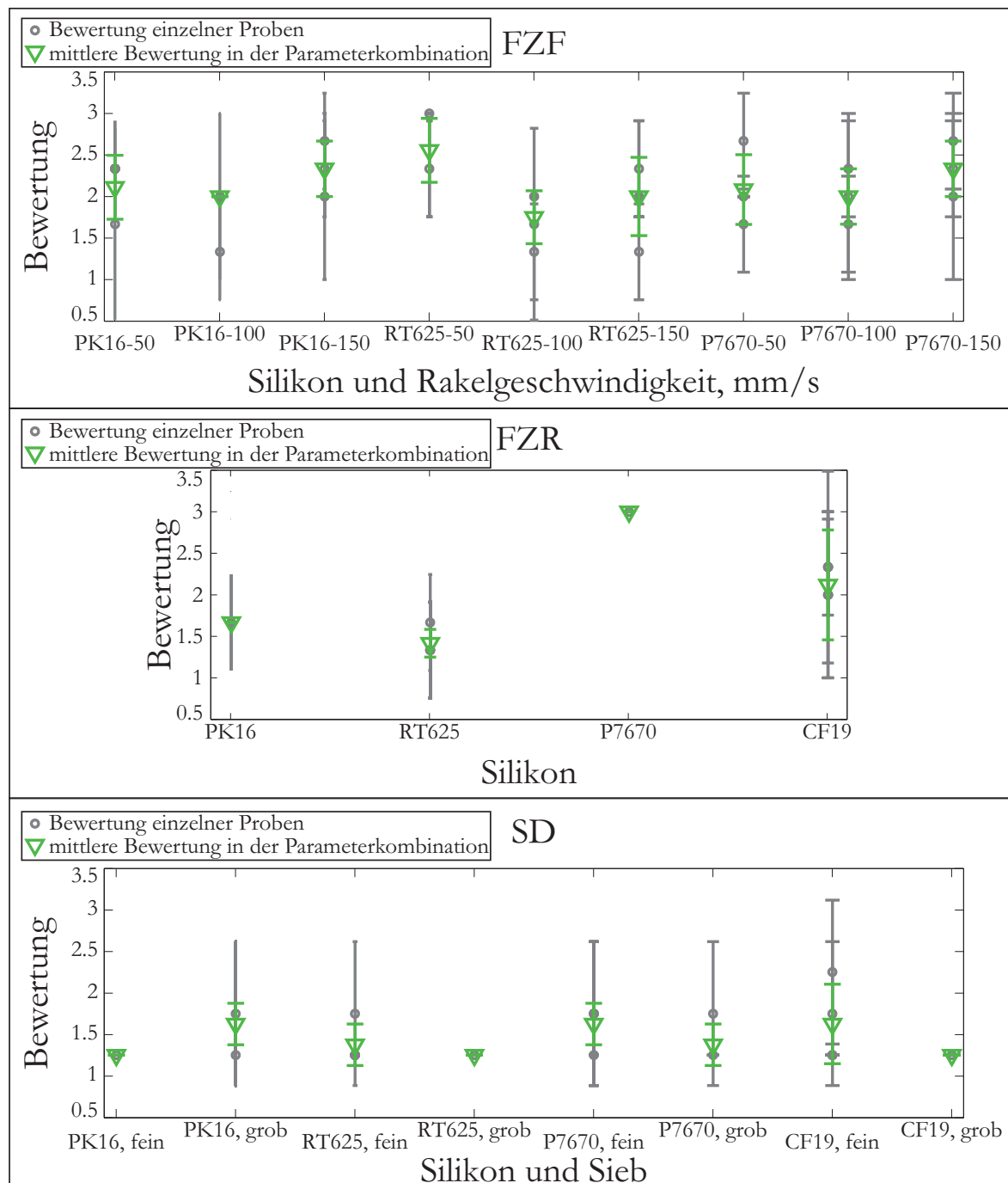


Abbildung 6.21.: Bewertungen zur Kategorie 2: Bewegungsrichtungsbedingte Merkmale, gruppiert über die Herstellungsverfahren FZF, FZR und SD, für die verwendeten Silikone und die variierten Prozessparameter.

der Vernetzung einsetzen, die sich in einem raschen und ggf. ungleichmäßigen Anstieg der Viskosität äußern. Im Siebdruck und im Filmziehen-flach wird jeweils eine kleine Silikonmenge (wenige Milliliter) vor dem Druck- bzw. Beschichtungsvorgang dosiert. Im Filmziehen-rund hingegen wird eine viel größere Menge (ca. 30 ml) einmalig in ein Reservoir dosiert, da die Substratbahn kontinuierlich beschichtet wird (vgl. Abb. 2.19 auf S. 46). Der vernetzungsbedingte Viskositätsanstieg kann bei den genannten Silikon-zusätzlich zur Entstehung von Unebenheiten und Streifen in Bewegungsrichtung beitragen.

**Kategorie 3: Oberflächenmakromuster.** In der Kategorie 3 werden Inhomogenitäten behandelt, die sich in Makromustern (bis zu mehreren Zentimetern) äußern und die nicht direkt auf den Herstellungsprozess zurückzuführen sind. In Tabelle 6.4 sind die Bewertungen aus der Probandenstudie aufgelistet, die - wie auch bei den Kategorien 1 und 2 - über die Kombination „Silikon-Herstellungsverfahren-Prozessparameter“ gemittelt sind. Die einzelnen und die gemittelten Bewertungen zur Kategorie 3, sowie die Standardabweichungen sind in Abbildung 6.22 grafisch dargestellt.

Tabelle 6.4.: Bewertungen zur Kategorie 3: Oberflächenmakromuster.

FZF		FZR		SD	
Bezeichnung der Proben	Bewertung	Bezeichnung der Proben	Bewertung	Bezeichnung der Proben	Bewertung
PK16-50	$1,67 \pm 0,33$	PK16	$2,67 \pm 0,27$	PK16-fein	$1,00 \pm 0,00$
PK16-100	$1,50 \pm 0,24$	RT625	$2,00 \pm 0,27$	PK16-grob	$1,17 \pm 0,19$
PK16-150	$1,67 \pm 0,33$	P7670	$1,50 \pm 0,33$	RT625-fein	$1,08 \pm 0,17$
RT625-50	$1,56 \pm 0,19$	CF19	$2,00 \pm 0,54$	RT625-grob	$1,00 \pm 0,00$
RT625-100	$1,75 \pm 0,57$			P7670-fein	$1,08 \pm 0,17$
RT625-150	$1,50 \pm 0,43$			P7670-grob	$1,25 \pm 0,17$
P7670-50	$1,67 \pm 0,00$			CF19-fein	$1,00 \pm 0,00$
P7670-100	$1,89 \pm 0,51$			CF19-grob	$1,08 \pm 0,17$
P7670-150	$1,78 \pm 0,19$				

Sehr gute Ergebnisse hat in dieser Kategorie der Siebdruck. Wie im Kapitel 5.1 beschrieben, konnte das Problem der statischen Aufladung, die in spezifischen Mustern resultierte, beim Siebdruck durch die Verwendung von Metallablagen erfolgreich gelöst werden. In einem geringen Maße trat dieses Problem im Filmziehen-flach auf. Durch die Verwendung eines Applikators aus Metall als Rakel und die sofortige Vernetzung der Schicht direkt auf dem Glastisch des Filmziehgeräts konnte die negative Auswirkung der statischen Aufladung zum größten Teil vermieden werden. Dennoch trat dieser Effekt ab und an unkontrolliert auf, was vor allem auf die niedrige für die kalten Jahreszeiten typische Luftfeuchtigkeit zurückzuführen ist. Die Herstellung der Silikon-schichten in einem klimatisierten Raum mit Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsregelung würde dieses Problem dauerhaft lösen.

Die mit Abstand schlechtesten Bewertungen bzgl. der Kategorie 3 bekamen die Film-ziehen-rund-Proben. Die Inhomogenitäten äußern sich dabei in rautenförmigen Mus-

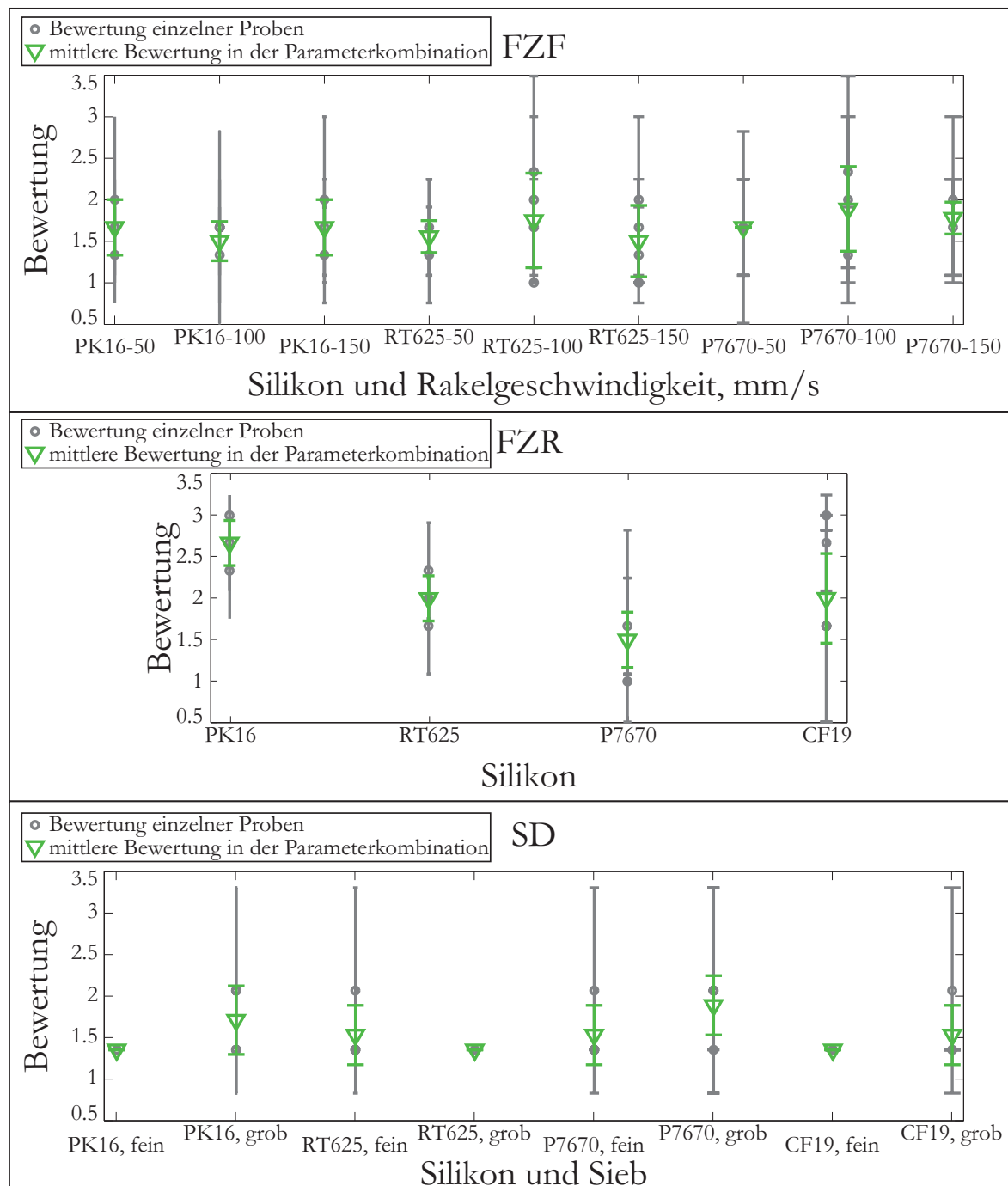


Abbildung 6.22.: Bewertungen zur Kategorie 3: Oberflächenmakromuster, gruppiert über die Herstellungsverfahren FZF, FZR und SD, für die verwendeten Silikone und die variierten Prozessparameter.

tern an der Silikonoberfläche (vgl. Abb. 6.17 auf S. 107), deren Ursprung bisher unklar ist. Die Ausnahme bei den schlechten Bewertungen ist das Elastosil P7670. Hier ist die gute Bewertung in der Kategorie 3 vermutlich auf die sehr schlechte Bewertung in der Kategorie 2 zurückzuführen. Bei den Proben aus Elastosil P7670 ist die bewegungsbedingte Streifigkeit so stark, dass diese ein Rautenmuster „überdeckt“.

Da die Inhomogenitäten der Kategorie 3 keinen direkten Zusammenhang mit den Herstellungsverfahren haben, lässt sich ebenfalls kein Zusammenhang zwischen den Prozessparametern bzw. den Silikonen und der Stärke der Inhomogenitäten beobachten.

**Gesamtnote und  $\ln H$ .** Nach der Diskussion der einzelnen Kategorien der Inhomogenitäten, können die Proben nun allgemein miteinander verglichen werden. Dazu werden der Gesamteindruck (ausgedrückt durch die Gesamtnote) in der Probandenstudie und die logarithmische Form des Homogenitätswertes  $\ln H$  herangezogen (vgl. Anhang C). Die Werte sind tabellarisch in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5.: Gesamtnote und  $\ln H$  (vgl. Anhang C) für die jeweiligen Kombinationen Herstellungsverfahren-Silikon-Prozessparameter.

FZF			FZR			SD		
Bezeichnung der Proben	$\ln H$	Gesamt- note	Bezeichnung der Proben	$\ln H$	Gesamt- note	Bezeichnung der Proben	$\ln H$	Gesamt- note
PK16-50	1,87	$2,44 \pm 0,19$	PK16	2,09	$2,58 \pm 0,17$	PK16-fein	1,83	$1,00 \pm 0,00$
PK16-100	2,08	$2,33 \pm 0,47$	RT625	2,20	$2,50 \pm 0,19$	PK16-grob	1,49	$1,17 \pm 0,19$
PK16-150	1,70	$2,33 \pm 0,33$	P7670	2,05	$2,67 \pm 0,00$	RT625-fein	1,47	$1,00 \pm 0,00$
RT625-50	2,13	$2,78 \pm 0,19$	CF19	2,18	$2,62 \pm 0,18$	RT625-grob	1,83	$1,67 \pm 0,47$
RT625-100	2,11	$2,25 \pm 0,32$				P7670-fein	1,98	$1,92 \pm 0,32$
RT625-150	2,15	$2,25 \pm 0,17$				P7670-grob	1,84	$1,92 \pm 0,50$
P7670-50	1,96	$2,17 \pm 0,33$				CF19-fein	2,05	$1,08 \pm 0,17$
P7670-100	1,87	$2,11 \pm 0,19$				CF19-grob	1,82	$1,17 \pm 0,19$
P7670-150	2,13	$2,33 \pm 0,33$						

In Kapitel 6.2.2 wurde gezeigt, dass ein merklicher linearer Zusammenhang zwischen den Werten der Gesamtnote und  $\ln H$  besteht. Bei der Betrachtung stimmen die Verhältnisse der Werte nicht in jedem einzelnen Fall überein. Dennoch lassen sich aus beiden Werten ähnliche allgemeinen Schlüsse ziehen. Dies wird aus Tabelle 6.6 ersichtlich. Hier werden die 21 Kombinationen Herstellungsverfahren-Material-Prozessparameter (Probenkategorien) nach  $\ln H$  und der Gesamtnote geordnet. Niedrigere Werte bedeuten dabei eine bessere Qualität der Proben und daher eine höhere Platzierung. Die 21 Probenkategorien wurden in drei Gruppen - besten sieben, mittlere und schlechtesten sieben - gegliedert. Bei der Platzierung nach  $\ln H$  sind diese Gruppen in der Tabelle mit waagrechten Linien und bei der Platzierung nach Gesamtnote farblich (grün - 1 bis 7, blau - 8 bis 14, rot - 15 bis 21) voneinander getrennt. In den beiden Gruppen der am besten und schlechtesten platzierten Probenkategorien stimmen je fünf von sieben überein. In der mittleren Gruppe ist die Übereinstimmung geringer und beträgt drei von sieben Probenkategorien.

Zur besseren Übereinstimmung des Homogenitätswerts  $H$  und der visuellen Gesamtnote müssen vermutlich weitere Schritte unternommen werden. So wird der jetzige Homogenitätswert  $H$  vom Rauschen der Kamera beeinflusst. Dagegen können bei der Verarbeitung der Bildinformationen Glättungsfunktionen angewendet werden. Zudem kann der mathematische Zusammenhang zwischen den beiden Größen durchaus

## 6. Diskussion

Tabelle 6.6.: Platzierungen der Probenkategorien nach  $\ln H$  und nach Gesamtnote (je kleiner die Werte, desto höher die Platzierung und die Qualität der Proben). Die 21 Probenkategorien wurden in drei Gruppen - besten sieben, mittlere und schlechtesten sieben Probenkategorien laut  $\ln H$  bzw. Gesamtnote - gegliedert. Zur Veranschaulichung wurden bei der Platzierung nach Gesamtnote die Plätze 1 bis 7 grün, 8 bis 14 blau und 15 bis 21 rot markiert.

Probenkategorie	Platzierung nach $\ln H$	$\ln H$	Platzierung nach Gesamtnote	Gesamtnote ohne $\sigma$
SD-RT625-fein	1	1,47	2	1,00
SD-PK16-grob	2	1,49	4	1,17
FZF-PK16-150	3	1,70	14	2,33
SD-CF19-grob	4	1,82	5	1,17
SD-PK16-fein	5	1,83	1	1,00
SD-RT625-grob	6	1,83	6	1,67
SD-P7670-grob	7	1,84	8	1,92
FZF-PK16-50	8	1,87	16	2,44
FZF-P7670-100	9	1,87	9	2,11
FZF-P7670-50	10	1,96	10	2,17
SD-P7670-fein	11	1,98	7	1,92
FZR-P7670	12	2,05	20	2,67
SD-CF19-fein	13	2,05	3	1,08
FZF-PK16-100	14	2,08	13	2,33
FZR-PK16	15	2,09	18	2,58
FZF-RT625-100	16	2,11	11	2,25
FZF-RT625-50	17	2,13	21	2,78
FZF-P7670-150	18	2,13	15	2,33
FZF-RT625-150	19	2,15	12	2,25
FZR-CF19	20	2,18	19	2,62
FZR-RT625	21	2,20	17	2,50

komplizierter sein, als der bisher angenommene logarithmische. Dieser kann anhand einer Regressionsanalyse ermittelt werden. Wünschenswert wäre eine evtl. gewichtete Berücksichtigung der Art der Inhomogenitäten bei der Berechnung des Homogenitätswertes  $H$ . Die Anpassung des Homogenitätswerts und die genaue Ermittlung seiner Korrelation mit den visuellen Daten gehören nicht zu den Schwerpunkten dieser Arbeit und wird deshalb nicht weiter ausgeführt.

Die Werte der Gesamtnote und die von  $\ln H$  sowie die darauf basierenden Platzierungen deuten daraufhin, dass der Siebdruck am besten zur Herstellung von dünnen großflächigen Silikonschichten geeignet ist. Am zweitbesten schneiden die Schichten, die mittels Filmziehen-flach hergestellt wurden, ab. Die schlechtesten Ergebnisse ergab das Filmziehen-rund. Laut der Bewertung des Gesamteindrucks und des  $\ln H$  haben die Siebdruckschichten aus WACKER Elastosil PK16 und RT625 mit Abstand die beste



Qualität unter den getesteten Verfahren und Silikonen.

**Fazit.** 78 Proben wurden unter Variation der Verfahren (Filmziehen-flach, Filmziehen-rund und Siebdruck), der dazugehörigen Prozessparameter sowie vier Silikone hergestellt (vgl. Kapitel 5.1). Anschließend wurden diese anhand ihrer Schattenabbildungen im Rahmen einer Probandenstudie zur visuellen Abmusterung bezüglich der Anwesenheit und Ausprägung dreier Kategorien von Inhomogenitäten sowie des Gesamteindrucks ausgewertet. Zusätzlich wurde eine automatisierte Auswertung der Schattenabbildungen in Matlab vorgenommen, wodurch deren Homogenitätswert  $H$  bestimmt wurde.

Anhand dieser Daten konnte nachgewiesen werden, dass der Siebdruck am besten zur Herstellung dünner Silikonschichten geeignet ist. Für den Siebdruck spricht zusätzlich die Möglichkeit, strukturierte Silikonschichten für zukünftige DEA-Designs anhand eines alternativen Schablonenlayouts herzustellen. Sehr präzise können dabei die Schichten übereinander gedruckt werden. Filmziehen-flach ist eine Lösung, die keinen zusätzlichen Aufwand, wie Design und Bestellung der Siebe, erfordert. Es müssen jedoch die Schichtinhomogenitäten in Bewegungsrichtung berücksichtigt werden. Das schlechte Abschneiden des Filmziehen-rund ist durch zwei Faktoren bedingt. Zum einen, liegt es an Art der Silikondosierung, bei der eine große Menge an bereits vermischem Silikon in ein Reservoir gekippt wird, wodurch der kontinuierliche Beschichtungsvorgang und die Vernetzung zum Teil zeitgleich stattfinden. Dieses Problem kann durch Verwendung von Inhibitoren oder Silikonen mit einer längeren Topfzeit gelöst werden. Zum anderen waren die für die vorliegende Arbeit hergestellten Proben durch das rautenförmige Muster geprägt, dessen Ursprung nicht geklärt werden konnte. Läge deren Ursache bei der Anlage und wäre jene bekannt, so könnte das Problem auch beseitigt werden. Das Filmziehen-rund hätte dann ein hohes Potential zur Herstellung von dünnen Silikonschichten.

Generell empfiehlt sich eine Herstellung der Schichten in einem Reinraum, wo die Umgebungsluft nahezu staubfrei ist. Ebenfalls ist es äußerst wichtig, statische Aufladungen, die in Schichtdefekten resultierten, zu möglichst zu vermeiden. Qualitätsfördernd ist außerdem eine auf Standardbedingungen klimatisierte Umgebung mit einer stabilen Luftfeuchtigkeit.

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren, eignen sich alle vier Silikone zur Herstellung von DEA-Schichten. NUSIL CF19-2186 konnte aufgrund seiner hohen Viskosität im Filmziehen-flach nicht verarbeitet werden. WACKER Elastosil P7670 lieferte aufgrund seiner kurzen Topfzeit schlechte Ergebnisse im Filmziehen-rund. Die Silikone WACKER Elastosil PK16 und RT625 ergaben innerhalb der Herstellungsverfahren vergleichbare Ergebnisse. Die besten Proben wurden mit WACKER Elastosil PK16 und RT625 im Siebdruck hergestellt. Prozesstechnisch gesehen ist die Verwendung von Silikonen mit längeren Topfzeiten und einer durch einen Außenimpuls (Wärmezufuhr) beschleunigten Vernetzung vorteilhaft.

Im Filmziehen-flach konnte kein direkter Zusammenhang zwischen der Qualität der Schichten und der variierten Rakelgeschwindigkeit festgestellt werden. Im Siebdruck resultierte die Benutzung des groben Siebs in einer hohen Anzahl an Einschlüssen in und auf den Schichten. Diese könnten bei der Herstellung in einer nahezu staubfreien Umgebung deutlich verringert werden. Das Sieb könnte dadurch im Einklang mit der

## 6. Diskussion

gewünschten Schichtdicke ausgewählt werden.

Es wurde gezeigt, dass die Herstellung von großflächigen dünnen Silikonschichten mit den vier ausgewählten Silikonen und den drei Druck- und Beschichtungsverfahren möglich ist. Eine endgültige Aussage über die Eignung der Schichten für DEA kann nach ausführlichen mechanischen und elektrischen Tests gemacht werden, die nicht im Fokus dieser Arbeit liegen.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelt zwei Themenstellungen. Zum einen wird nach einer Kombination Material-Verfahren gesucht, die die Herstellung großflächiger (ca. DIN A5) dünner Silikonschichten ermöglicht. Die Anforderungen an die Schichten stellt dabei ihr Einsatzzweck als Dielektrikum in dielektrischen Stapelaktoren, die als Sensor und/oder Aktor bei taktilen Eingabegeräten dienen. Der Suche liegen Druck- und Beschichtungsverfahren sowie Silikone als gewünschtes Material zugrunde. Es wird analysiert, welche Silikone mit welchem Verfahren in Schichten im Mikrometerbereich verarbeitet werden können.

Die sehr hohe dynamische Viskosität sowie die Polymerisationseigenschaften der Silikone schließen mehrere Druck- und Beschichtungsverfahren aus, die für Materialien mit anderen Eigenschaften ausgelegt sind. Die theoretische Auswahl fällt auf den Siebdruck und auf das Filmziehen, das in Bogen- (flach) und Rolle-zu-Rolle-Form (rund) zur Verfügung steht. Nach der Analyse der Eigenschaften und der prozess- und anwendungsbedingten Anforderungen an die Silikone, werden vier zweikomponentige RTV-Silikone ausgewählt. In jeder Kombination Silikon-Verfahren werden Proben bei variierenden Prozessparametern hergestellt.

Um die auf unterschiedliche Weise hergestellten Proben miteinander vergleichen und eine Aussage über ihre Qualität treffen zu können, wird deren Schichthomogenität herangezogen. Dazu bedarf es einer Charakterisierungsmethode. Die hergestellten Silikonschichten werden durch eine sehr hohe Transparenz geprägt, was deren Vermessung bzw. Charakterisierung erschwert. Mehrere existierende und etablierte Methoden zur Schichtcharakterisierung zeigen sich dabei als kaum oder nicht geeignet. Diese Tatsache ist der Anstoß zur Entwicklung einer neuen optischen Methode zur Schichtcharakterisierung, die zum zweiten Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit wird.

Als Basis für diese Methode dient das Prinzip der Schattenabbildung. Ein Lichtstrahl, der eine transparente Schicht durchdringt, wird von Schichtinhomogenitäten wie Schichtdickenschwankungen, Einschlüssen oder ähnlichen anders gebrochen, als ein Lichtstrahl, der eine ideale Schicht durchdringt. Werden diese Lichtstrahlen anschließend auf einen Schirm projiziert, können die Schichtinhomogenitäten anhand der von ihnen verursachten Schatten bzw. Lichtintensitätsänderungen am Schirm detektiert werden. Zum Testen der Methode wird eine Machbarkeitsstudie mit einem einfachen Versuchsaufbau und einer kleinen Probenanzahl durchgeführt. Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie fließen in die Konstruktion des Prüfstands ein. Dieser besteht aus einer LED, einer Digitalkamera, einem Gestell, auf dem die ersten beiden Elemente samt einer Probenhalterung fixiert werden, sowie einer Leinwand. Die Schattenabbildungen der untersuchten Proben auf der Leinwand werden mittels der Kamera aufgenommen und analysiert.

Die entwickelte Charakterisierungsmethode wird anhand weißlichtinterferometrischer Messungen validiert. Ebenfalls werden die Grenzen des optischen Prüfstands ermittelt.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Es können damit nicht Schichtdickenvariationen und Welligkeiten im Zentimeterbereich erfasst werden. Die feinsten detektierbaren Strukturen liegen bei ca. 260  $\mu\text{m}$ . Bei gegebener hohen Transparenz ist die optische Methode bei der Anwendung im untersuchten Schichtdickenbereich schichtdickenunabhängig und kann auch zur Charakterisierung anderer Materialien herangezogen werden.

Für die Analyse der aufgenommenen Schattenabbildungen werden zwei Werkzeuge angewendet. Zum einen werden die digitalisierten grafischen Informationen mathematisch ausgewertet. Hierfür wird der Homogenitätswert  $H$  eingeführt, der ein Maß für die mittlere Lichtintensitätsänderung darstellt. Dieser gibt eine quantitative Aussage über die Homogenität der Schicht, behandelt aber nicht die Art und Größe einzelner Schichtinhomogenitäten. Um diese in die Analyse der Schichten miteinbeziehen zu können, wird eine visuelle Probandenstudie durchgeführt. Basierend auf den vorhandenen Schattenabbildungen werden drei Inhomogenitätskategorien definiert. Diese sind Einschlüsse, bewegungsrichtungsbedingte Merkmale und Oberflächenmakromuster. Die Aufgabe der drei Probanden ist es, jede Schattenabbildung anhand der drei Kategorien sowie des Gesamteindrucks zu bewerten.

Die Ergebnisse der Probandenstudie zeigen, dass die Herstellungsumgebung einen Einfluss auf die Qualität der Schichten hat. Zur Herstellung der Schichten wird deshalb ein Reinraum mit stabilen klimatischen Bedingungen (konstante Luftfeuchtigkeit, geringe Anzahl an Staubpartikel) empfohlen. Durch diese Umgebung würden die negativen Auswirkungen minimiert, die durch die Staub- und Schmutzpartikel in der Luft sowie durch die statische Aufladung der in den Herstellungsprozess involvierten Bauteile entstehen können. Die Proben hergestellt im Filmziehen-flach und Filmziehen-rund zeichnen sich durch starke Inhomogenitäten in der Beschichtungsrichtung aus. Die Siebdruckproben weisen keine Bewegungsrichtungsabhängigkeiten auf.

Die Proben hergestellt im Filmziehen-rund sind durch rautenförmiges Muster gezeichnet, dessen Ursache nicht geklärt werden kann. Vermutlich, liegt diesem ein Konstruktionsmerkmal der Beschichtungsanlage zugrunde. Um dies zu überprüfen, sind weitere Untersuchungen an anderen Beschichtungsanlagen notwendig.

Unter der Annahme einer staubfreien Umgebung, kann kein Einfluss des Siebes auf die Qualität der Siebdruckschichten festgestellt werden. Ebenfalls kann kein Zusammenhang zwischen der Beschichtungsgeschwindigkeit im Filmziehen-flach und der Schichtqualität festgestellt werden.

Alle vier verwendeten Silikone sind grundsätzlich für die Herstellung von dünnen Schichten geeignet. Im Filmziehen-flach muss sichergestellt werden, dass die dynamische Viskosität des Silikons nicht zu hoch ist, damit eine vollständige Abdeckung des Substrats gewährleistet werden kann. Sehr vorteilhaft wäre bei allen untersuchten Verfahren die Verwendung von Silikonen mit einer (unendlich) langen Topfzeit. Dabei könnte die Vernetzung durch einen Außenimpuls (z.B. Wärmezufuhr) anregbar und innerhalb eines kurzen Zeitintervalls (mehrere Sekunden bis wenige Minuten) abgeschlossen sein. Die chemische Modifikation von Silikonen oder die Suche nach anderen Lösungen, um zeitliche Einschränkungen bedingt durch kurze Topfzeiten zu verhindern (z.B. Verwendung von Inhibitoren), könnte im Fokus nachfolgender Untersuchungen stehen.

Zusammenfassend erweist sich jedes untersuchte Verfahren für die Herstellung von dünnen Silikonschichten als geeignet. Die besten Ergebnisse liefert dabei der Siebdruck. Die zweitbesten Ergebnisse werden im Filmziehen-flach erreicht. Am schlechtesten

ten schneidet das Filmziehen-rund ab, wobei hier die Abhängigkeit der Schichtqualität von der Beschichtungsanlage untersucht werden sollte. Für eine endgültige Entscheidung, ob sich die hergestellten Schichten in allen Hinsichten für die Anwendung in DEAs eignen, bedarf zusätzlicher ausführlicher mechanischer und elektrischer Untersuchungen.

Die in dieser Arbeit entwickelte optische Methode auf Basis der Schattenabbildung hat ein hohes Potenzial zum Einsatz in einem Inline-Messsystem. Die Schichthomogenität könnte direkt in der Produktionsmaschine charakterisiert werden. Hierfür wäre der Einsatz einer Rückprojektionsleinwand vorstellbar, der allerdings teurer ist. Dabei wäre ein Aufbau, wie in Abbildung 7.1 gezeigt, vorstellbar. Dieser könnte für Inline-Messungen direkt in der Druck- oder Beschichtungsanlage eingesetzt werden. Die Schatten, die in diesem Fall von der bedruckten oder beschichteten Bahn auf die Rückprojektionsleinwand geworfen werden, können von einer Kamera aufgenommen werden, die sich hinter der Rückprojektionsleinwand befindet. Eine Alternative zur Rückprojektionsleinwand wäre die Projektion der Schatten direkt auf den Sensor der Kamera. Bei der Benutzung einer Vollformatkamera wäre ein zusätzlicher optischer Aufbau notwendig, um die großflächige (DINA5 oder größer) Schattenabbildung auf die Größe des Sensors, die  $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$  beträgt [51], zu verkleinern. Möglich wäre ebenfalls die Nutzung einer Zeilenkamera, wobei sich die endgültige Schattenabbildung aus einzelnen Zeilen zusammensetzen würde.

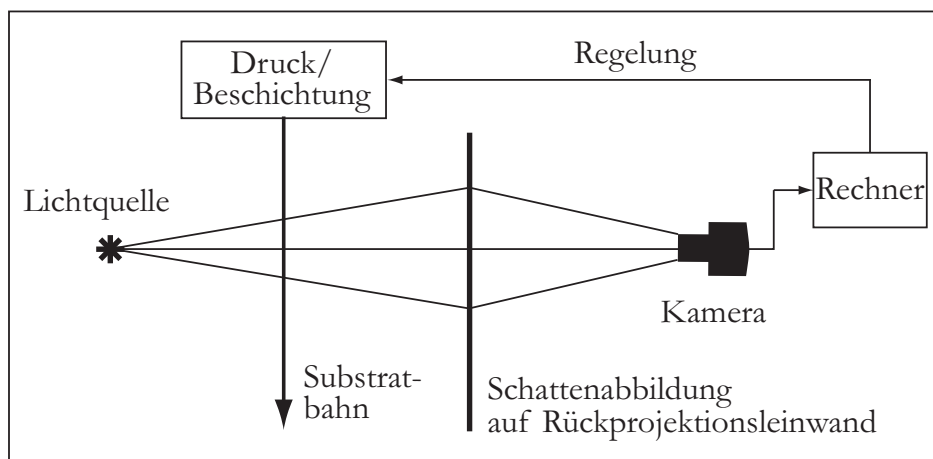


Abbildung 7.1.: Möglicher Messaufbau bei einer Inline-Messung mit Benutzung einer Rückprojektionsleinwand, der eine direkte Prozessregelung ermöglicht.

Die Kameradaten werden zu einer Recheneinheit weitergegeben, was eine direkte Prozessregelung in der Maschine ermöglichen würde. Hierfür wäre die Entwicklung einer Inhomogenitäten-Datenbank und eines darauf basierenden Erkennungsalgorithmus von Nutzen. Die Weiterentwicklung des Homogenitätswerts  $H$  im Bezug auf die Qualität der Inhomogenitäten, sowie auf die prozessrelevanten Anforderungen und auf die menschliche Wahrnehmung würde einen schnellen und direkten Vergleich der Proben miteinander ermöglichen.

## *7. Zusammenfassung und Ausblick*

# Literaturverzeichnis

- [1] 3M: VHB® Hochleistungs-Verbindungssysteme 4905, 4910, 4915, 4918 Produkt-Information, 2004
- [2] ADACHI, C.; NAKANOTANI, H.: Organic Semiconductor Laser Materials. In: *Material Matters* 4.3, 74 (2009)
- [3] AGC CHEMICALS ASAHI GLASS CO., LTD.: *Cytop Produkt-Katalog*, 2009
- [4] ALBRECHT, H.; BARTZ, W. J. (Hrsg.): *Optische Strahlungsquellen*. Lexika-Verlag, 1977
- [5] ARSLANTÜRK, B. K.: *Silikone für taktile Anwendungen: Wichtigste Parameter, Klassifizierung und Charakterisierung*. Betreuerin: Haas, M., Technische Universität Darmstadt, Bachelor-Thesis, 2013
- [6] BACH, F.-W. (Hrsg.); MÖHNWALD, K. (Hrsg.); LAARMANN, A. (Hrsg.) ; WENZ, T. (Hrsg.): *Moderne Beschichtungsverfahren*. DGM, Wiley-VCH, 2005
- [7] BAO, Z.; ROGERS, J. A. ; KATZ, H. E.: Printable organic and polymeric semiconducting materials and devices. In: *Journal of Materials Chemistry* 9 (1999), S. 1895–1904
- [8] BAR-COHEN, Y.: Electroactive Polymers as Artificial Muscles: A Review. In: *Journal of Spacecraft and Rockets* 39 (2002), S. 822–827
- [9] BAR-COHEN, Y.: *Electroactive Polymer (EAP) Actuators As Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. SPIE Press, 2004 (Spie Press Monograph). – ISBN 9780819452979
- [10] BERGMANN, L.; NIEDRIG, H.; EICHLER, H.J. ; SCHAEFER, C.: *Lehrbuch der Experimentalphysik Bd.3 Optik: Wellen- und Teilchenoptik*. Walter de Gruyter, 2004. – ISBN 9783110170818
- [11] BERTRAN, F. L.; PURSALS, R. A. ; ARTIGUES, C. C.: *Dual Technology Optical Profilometer*. U.S. Patent US 2007/0165241 A1, Jul. 19, 2007
- [12] BORNEMANN, N.: *Characterization and Investigation of Large Area, Ultra-Thin Gravure Printed Layers*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2013. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3847>
- [13] BORNEMANN, N.; THIEME, R.; SAUER, H. M. ; DÖRSAM, E.: Evaluation and Determination of Gravure Cylinders for Functional Printing. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2011
- [14] BROCHU, P.; PEI, Q.: Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles. In: *Macromolecular Rapid Communications* 31 (2010), S. 10–36

- [15] BUCKLEY, A.: *Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs): Materials, Devices and Applications*. Elsevier Science, 2013 (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials). – ISBN 9780857098948
- [16] CARPI, F.; DE ROSSI, D. ; KORNBLUH, R.: *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. Elsevier, 2008. – ISBN 9780080474885
- [17] CARPI, F.; MIGLIORE, A.; SERRA, G. ; DE ROSSI, D.: Helical dielectric elastomer actuators. In: *Smart Materials and Structures* 14 (2005), S. 1210–1216
- [18] CARPI, F.; SALARIS, C. ; DE ROSSI, D.: Folded dielectric elastomer actuators. In: *Smart Materials and Structures* 16 (2007), S. 300–305
- [19] CELEXON: *Technische Daten für CELEXON Stativleinwand Economy*, 2013
- [20] COHEN, E.; GUTOFF, E.: *Modern coating and drying technology*. VCH Publishers, Inc., 1992
- [21] DANILOWA, T.: *Zifrowaja Fotografija. Populjarnii Samoutschitel*. Isdatelskii Dom Piter, 2005
- [22] DE IZARRA, G.; DE IZARRA, CH.: Quantitative shadowgraphy made easy. In: *European Journal of Physics* 33 (2012), S. 1821–1842
- [23] DEMANT, C.; STREICHER-ABEL, B. ; WASZKEWITZ, P.: *Industrielle Bildverarbeitung: wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*. Springer, 2002. – ISBN 9783540419778
- [24] DERTINGER, J.; LÄMMERHIRT, M.: Nachtschicht in München. In: *Photographie* 3 (2010), S. 44–49
- [25] DÖRSAM, E.: *Einführung in die Druck- und Medientechnik*. Vorlesung: Technische Universität Darmstadt, 2014
- [26] DOW CORNING: *Sylgard 184 Silicone Elastomer. Product Information*, 2010
- [27] DUMM, T.; SCHILD, H.: *Strahlenoptik, Schwingungen und Wellen: Lerntext, Aufgaben mit kommentierten Lösungen und Kurztheorie*. Compendio Bildungsmedien, 2009 (Ein Physik-Lehrmittel für Mittelschulen und das Selbststudium). – ISBN 9783715593739
- [28] DUNN-RANKIN, D.; WEINBERG, F. J.: Location of the Schlieren Image in Premixed Flames: Axially Symmetrical Refractive Index Fields. In: *Combustion and Flame* 113 (1998), S. 303–311
- [29] DVORÁK, V.: Über eine neue einfache Art der Schlierenbeobachtung. In: *Wiedemanns Annalen der Physik* 1880 (9), S. 502–511
- [30] EUROPEAN BLIND UNION: *Key facts and figures concerning blindness and sight loss*. [www.euroblind.org](http://www.euroblind.org). Version: September 2013
- [31] FLETCHER, G.: *Residential Construction Academy: House Wiring*. Cengage Learning, 2011 (Residential Construction Academy). – ISBN 9781111306212
- [32] FOX, M. D.; WEINBERG, F. J.: Optical methods for the study of flames in turbulent pre-mixed gas streams. In: *British Journal of Applied Physics* 11 (1960),



S. 269–272

- [33] FRÜHAUF, J.: *Werkstoffe der Mikrotechnik*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2005. – ISBN 9783446225572
- [34] GANZ, S.; PANKALLA, S.; SAUER, H. M.; GLESNER, M. ; DÖRSAM, E.: Printing technique dependent charge carrier velocity distribution in organic thin film transistors. In: *SPIE Optics&Photonics* Bd. 8831, 2013
- [35] GIESSMANN, A.: *Substrat- und Textilbeschichtung. Praxiwissen für Textil-, Bekleidungs- und Beschichtungsbetriebe*. Springer, 2003
- [36] GILES, H.F.; WAGNER, J.R. ; MOUNT, E.M.: *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. Elsevier Science, 2013 (Plastics Design Library). – ISBN 9781437734829
- [37] GOLDSCHMIDT, A.; STREITBERGER, H. J.: *BASF-Handbuch Lackiertechnik*. Vincentz, 2002. – ISBN 9783878703242
- [38] GRADY, J.O.: *System Validation and Verification*. Taylor & Francis, 1997 (Systems Engineering). – ISBN 9780849378386
- [39] GRIESHEIMER, S.: *Farbspaltungsphänomene von Druckfarben an strukturierten Oberflächen am Beispiel des Flexodrucks*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2013. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3892/>
- [40] GRIESHEIMER, S.; STEFFEN, V.: Labormaschine für das funktionale Drucken im Siebdruckverfahren gemeinsam entwickelt. In: *Der Siebdruck* 57 (9) (2011), S. 12–13
- [41] GROH, A.; KHANH, T. Q.: Round Robin Test: Measurement of High Power LEDs. In: *International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)* Bd. 10, 2013
- [42] HAAS, M.: *Untersuchungen zum Verdrucken von Interferenzeffektfarben im Flexodruckverfahren*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2012. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3011>
- [43] HAAS, M.; DÖRSAM, E.: Mittels Siebdruck und Filmziehen hergestellte dielektrische Elastomeraktoren. In: *Der Siebdruck* 12.2012/01.2013 (2012), S. 44–46
- [44] HAAS, M.; SAUER, H. M. ; DÖRSAM, E.: Optical Surface Characterization Method of Silicone Layers Used for Manufacturing of Dielectric Elastomer Actuators. In: *Advances in Printing and Media Technology* Bd. XL. Chemnitz, Germany: 40th International Conference of Iarigai, 2013
- [45] HABENICHT, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 9783540852643
- [46] HAIN, J.: *Abhängigkeit zweier Merkmale*. Vorlesung: Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2014
- [47] HALL, D. B.; UNDERHILL, P. ; TORKELSON, J. M.: Spin Coating of Thin and Ultrathin Polymer Films. In: *Polymer Engineering & Science* 38 (2004)
- [48] HAMILTON, D. K.; WILSON, T.: Three-Dimensional Surface Measurement Using the Confocal Scanning Microscope. In: *Applied Physics B: Photophysics and Laser Chemistry*. Springer-Verlag, 1982

- [49] HARTUNG, J.; ELPELT, B. ; KLÖSENER, K.H.: *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen*. Oldenbourg, 2005. – ISBN 9783486578904
- [50] HELLSTROM, S. L.: *Basic Models of Spin Coating*. Stanford University. <http://large.stanford.edu/courses/2007/ph210/hellstrom1/>. Version: 2007
- [51] HENNEMANN, M.: *Digitale Fotografie - der Meisterkurs*. Markt + Technik, 2010. – ISBN 9783827245946
- [52] HERNANDEZ-SOSA, G.; BORNEMANN, N.; RINGLE, I.; AGARI, M.; DÖRSAM, E.; MECHAU, N. ; LEMMER, U.: Rheological and Drying Considerations for Uniformly Gravure-Printed Layers: Towards Large-Area Flexible Organic Light-Emitting Diodes. In: *Advanced Functional Materials* (Feb. 2013)
- [53] HOLL, K.; HÖLL, K. ; NIESSNER, R.; NIESSNER, R. (Hrsg.): *Wasser: Nutzung im Kreislauf: Hygiene, Analyse und Bewertung*. De Gruyter, 2010. – ISBN 9783110226775
- [54] HOPFGARTEN, S.: *Matlab® für Ingenieure*. Vorlesung: Technische Universität Ilmenau, 2014
- [55] [HTTP://WWW.M-PETFILM.COM/](http://www.m-petfilm.com/): *Hostaphan® technische Daten*, Januar 2014
- [56] [HTTP://WWW.MODULOR.DE/](http://www.modulor.de/): *Silikon. Kleines Lexikon zum Thema Silikon*, Januar 2014
- [57] HUTCHINS, D. O.; WEIDNER, T.; BAIO, J. ; POLISHAK, B. a.: Effects of self-assembled monolayer structural order, surface homogeneity and surface energy on pentacene morphology and thin film transistor device performance. In: *Journal of Materials Chemistry C* 1 (2013), S. 101–113
- [58] INSTITUT FÜR DRUCKMASCHINEN UND DRUCKVERFAHREN: [http://www.idd.tu-darmstadt.de/re\\_search/equipm/printing\\_lab/index.de.jsp](http://www.idd.tu-darmstadt.de/re_search/equipm/printing_lab/index.de.jsp), Oktober 2013
- [59] JUNGSMANN, M.: *Entwicklung elektrostatischer Festkörperaktoren mit elastischen Dielektrika für den Einsatz in taktilen Anzeigefeldern*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2004. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/37935/>
- [60] KAAL, W.: *Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren mit gelochten Elektroden in der Strukturdynamik*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2014. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/4136>
- [61] KASSMANN, M.: *Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung*. Beuth Verlag GmbH, 2014 (Beuth Studium). – ISBN 9783410241935
- [62] KERN, T. A.: *Entwicklung Haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure*. Springer, 2008. – ISBN 9783540876434
- [63] KHANH, T. Q.; VINH, Q. T.; GROH, A. ; HAUSERKEMPER, N.: Präzise Bestimmung der thermischen und elektrischen Daten verschiedener Hochleistungs-LED-Typen mit verschiedenen Leiterplatten- und Kühlungssystemen. In: *Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG), Tagungsband Bd. 20*, 2012

- [64] KHOPKAR, S.M.: *Basic Concepts Of Analytical Chemistry*. New Age International Publishers, 1998. – ISBN 9788122411591
- [65] KIIL, H.-E.; BENSLIMANE, M.: Scalable Industrial Manufacturing of DEAP. In: *SPIE* Bd. 7287, 2009
- [66] KIPPHAN, H.: *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*. Springer, 2001. – ISBN 9783540673262
- [67] KITAI, A.: *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The Role of the PN Junction*. Wiley, 2011 (Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications Series). – ISBN 9781444318340
- [68] KLEIN, O.: *Telefonat am 27.01.2014*. Mitsubishi Polyester Film, 2014
- [69] KNOBLOCH, A.: *Mikroelektronikschaltungen aus gedruckten Polymeren*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2003
- [70] KÜCHLER, A.: *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Springer, 2005 (VDI-Buch). – ISBN 9783540214113
- [71] KÜHNE, C.: *Digitale Negative: Camera Raw*. Addison-Wesley Verlag, 2005
- [72] KUNERT, A.: *Farbmanagement in der Digitalfotografie*. mitp, 2006 (Edition Profifoto). – ISBN 9783826616457
- [73] LANDSBERG, G. S.: *Optika (Optik)*. Fismatlit, Moskau, 2010
- [74] LECHNER, M. D.; GEHRKE, K. ; NORDMEIER, E. H.: *Makromolekulare Chemie: Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage*. Birkhäuser Basel, 2009. – ISBN 9783764388904
- [75] LITFIN, G.: *Technische Optik in der Praxis*. Springer, 2004 (SpringerLink: Springer e-Books). – ISBN 9783540218845
- [76] LOTZ, P.: *Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidfördersystem*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2009. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/40543/>
- [77] LOTZ, P.; MATYSEK, M. ; SCHLAAK, H. F.: Peristaltic Pump made of Dielectric Elastomer Actuators. In: *Proceedings of SPIE* 7287 (2009)
- [78] LYASHENKO, A.: *Untersuchung des Prägefoliendrucks im Hinblick auf die Anwendung im Elektronikbereich*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2014. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3990/>
- [79] MARCHESI, J. J.: Bildprozessor. Vom rohen Bildsignal zum fertigen Foto. In: *Photographie* 4 (2010), S. 64–71
- [80] MARK, J. E.: *Physical Properties of Polymers. Handbook*. Springer, 2006. – ISBN 9780387312354
- [81] MARXKORS, R.: *Marxkors, Lehrbuch der zahnärztlichen Prothetik*. Dt. Zahnärzte-Verlag, 2007. – ISBN 9783769133530
- [82] MATYSEK, M.; LOTZ, P.; FLITTNER, K. ; SCHLAAK, H. F.: Vibrotactile Display for mobile applications based on dielectric elastomer stack actuators. In: *Proceedings of SPIE* 7642 (2010)

- [83] MATYSEK, M.; LOTZ, P. ; SCHLAAK, H. F.: Tactile Display with Dielectric Multilayer Elastomer Actuators. In: *Proceedings of SPIE* 7287 (2009)
- [84] MITSOULIS, E.; ATHANASOPOULOS, G.: Numerical Simulation of Blade-Over-Roll Coating forming Flows. In: *Computer Methods in Material Science* 10 (2010), S. 214–224
- [85] MITSUBISHI POLYESTER FILM GMBH: *Hostaphan® technisches Datenblatt*. 03/03, 2003
- [86] MITSUBISHI POLYESTER FILM GMBH: *Hostaphan® technisches Datenblatt*. 09/13, 2013
- [87] MÖSER, M.: *Technische Akustik*. Springer, 2009. – ISBN 9783642309335
- [88] MÖSSINGER, H.; HAUS, H.; KAUER, M. ; SCHLAAK, H. F.: Tactile feedback to the palm using arbitrarily shaped DEA. In: *Proceedings of SPIE* Bd. 9056. San Diego, California, USA : SPIE, 2014
- [89] MÖSSINGER, H.; HAUS, H. ; SCHLAAK, H. F.: EAP enabled PC mouse as tactile feedback human interface device. In: *Proceedings of EuroEAP* Bd. 3, 2013
- [90] MÜSSIG, F.: Touchen und Tippen. In: *c't* 2 (2013), S. 67–75
- [91] NAGDI, K.: *Gummi-Werkstoffe: Ein Ratgeber für Anwender*. Vogel-Verlag, Würzburg, 1981. – ISBN 9783980359375
- [92] NOLL, W.: *Chemie und Technologie der Silicone*. Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1968
- [93] PABST, O.; BECKERT, E.; EBERHARDT, R. ; TÜNNERMANN, A.: All Inkjet-Printed Electroactive Polymer Actuators for Active Microoptical and Polytronic Systems. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPEC)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2011
- [94] PANIGRAHI, P. K.; MURALIDHAR, K.: *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*. Springer, 2012 (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology). – ISBN 9781461445357
- [95] PANSHEF, V.: *Entwicklung eines Modells zur strategischen Geschäftsausrichtung von Unternehmen des Grafischen Gewerbes mittels einer wertschöpfungsorientierten Strukturierung von industriellen Serviceleistungen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2008. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/38679/>
- [96] PAPAILIOU, K.O.; SCHMUCK, F. ; FRÖHLICH, K.: *Silikon-Verbundisolatoren: Werkstoffe, Dimensionierung, Anwendungen*. Springer, 2011. – ISBN 9783642238130
- [97] PARSINEJAD, F.; KECK, J. C. ; METGHALCHI, H.: On the location of flame edge in Shadowgraph pictures of spherical flames: a theoretical and experimental study. In: *Experiments in Fluids* 43 (2007), S. 887–894
- [98] PASEIRO-LOSADA, P.; LÓPEZ-FABAL, M. F.; PÉREZ-LAMELA, C.; SANMARTÍN-FENOLLERA, P. ; PAZ-ABUÍN, S.: Two RP-HPLC Methods To Quantify and Identify Bisphenol A Diglycidyl Ether (BADGE): European Union Fatty Food

- Simulant (Olive Oil). In: *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 2 (1999), S. 202–209
- [99] PEDROTTI, F.; PEDROTTI, L.; BAUSCH, W. ; SCHMIDT, H.: *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. Springer, 2007. – ISBN 9783540228136
- [100] PELRINE, R.; KORNBLUH, R.; JOSEPH, J.; HEYDT, R.; PEI, Q. ; CHIBA, S.: High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators. In: *Elsevier Science Materials Science and Engineering*, 11 (2000), S. 89–100
- [101] POORTMANS, J.; ARKHIPOV, V.: *Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*. Wiley, 2006 (Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications). – ISBN 9780470091272
- [102] POST, S.: *Applied and Computational Fluid Mechanics*. Jones & Bartlett Learning, 2011 (Infinity Science Series). – ISBN 9781934015476
- [103] QUINTANS CAROU, J.; WILSON, S. K.; MOTTRAM, N. J. ; DUFFY, B. R.: Asymptotic and numerical analysis of a simple model for blade coating. In: *Journal of Engineering Mathematics* 63 (2009), S. 155–176
- [104] RABE, M.; SPIECKERMANN, S. ; WENZEL, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Springer, 2008 ((VDI-Buch) Chemische Technik Verfahrenstechnik). – ISBN 9783540352815
- [105] RANDAZZO, M.; BUZIO, R.; METTA, G.; SANDINI, G. ; VALBUSA, U.: Architecture for the semi-automatic fabrication and assembly of thin-film based dielectric elastomer actuators. In: BAR-COHEN, Y. (Hrsg.): *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* Bd. 6972, 2008
- [106] RANFELD, C.: *Drucktechnische Herstellung eines funktionalen Demonstrators*, Technische Universität Chemnitz, Diplomarbeit, 2010
- [107] RANFELD, C.: *Mittels Siebdruck hergestellte Elektrolumineszenz-Panels*. VDD-Seminar, Darmstadt, 2010
- [108] RANFELD, C.: *Wet etching of printed silver layers using an etch resist structured by flexography*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2014
- [109] RANFELD, C.; DÖRSAM, E. ; SAUER, H. M.: Flexography as a structured application method for etching resist. In: *Advances in Printing and Media Technology* Bd. XL. Chemnitz, Germany: 40th International Conference of Iarigai, 2013
- [110] RANFELD, C.; SAUER, H. M. ; DÖRSAM, E.: Using the Halo Effect in Flexographic Printing for the Manufacturing of Source/Drain-Structures for Thin Film Transistors. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2011
- [111] RANFELD, C.; THEOPOLD, A. ; DÖRSAM, E.: Flexographic printing for the production of inorganic electroluminescent devices. In: *Printing Future Days*, 2011
- [112] SALUN, L.: *Methode zur Beschreibung von Piezo-Inkjetsystemen mit der Netzwerktheorie am Beispiel eines Labordruckers*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2013. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3330>

- [113] SALUN, L.; DÖRSAM, E.: Stability and reproducibility of droplet formation in inkjet printing. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Munich, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2012
- [114] SAUER, H. M.; BORNEMANN, N. ; DÖRSAM, E.: Viscous fingering in functional flexo printing: an inevitable bug? In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2011
- [115] SAUER, H. M.; RANFELD, C. ; DÖRSAM, E.: An investigation of the screen printing process for electroluminescent panels and the influence of printing and operation parameters on the performance of the panels. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2010
- [116] SCHÄFER, J.: *Buy what you see - everywhere: Welche Möglichkeiten bietet die grafische Mustererkennung zur Verbesserung der Online-Produktsuche?* Bachelor + Master Publishing, ein Imprint der Diplomica® Verlag GmbH, 2012
- [117] SCHARDIN, H.: Die Schlierenverfahren und ihre Anwendungen. In: *Ergebnisse der exakten naturwissenschaften* Bd. 20. Springer Berlin Heidelberg, 1942. – ISBN 978-3-540-77206-4, S. 303–439
- [118] SCHAT, W.; WIETERS, K. P. ; KIEBACK, B.: *Pulvermetallurgie*. Springer, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 9783540236528
- [119] SCHEER, H. G.: *Siebdruck-Handbuch*. Verlag der Siebdruck, Lübeck, 2007
- [120] SCHIRA, J.: *Statistische Methoden der VWL und BWL: Theorie und Praxis*. Pearson Studium, 2009 (Pearson Studium - Economic BWL). – ISBN 9783868940206
- [121] SCHLÄPFER, K.: *Farbmetrik in der Reproduktionstechnik und im Merkfardruck*. 2. UGRA. Verein zur Förderung wissenschaftlicher Untersuchungen in der graphischen Industrie, 1993
- [122] SCHMIDT, U.: *Professionelle Videotechnik*. Springer, 2005. – ISBN 9783540242062
- [123] SCHOLDT, M.: *Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2013. <http://www.ksp.kit.edu/9783731500445>
- [124] SCHWANKE, D.: *Entwicklung nanotechnologischer Siebbeschichtungen und daran angepasster Pastensysteme für den Fine-Line-Druck von keramischen Schaltungsträgern. Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojekts "nanoSieb"*. Verlag Dr. Markus A. Detert, 2010
- [125] SETTLES, G. S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. Springer London, Limited, 2001 (Experimental Fluid Mechanics Series). – ISBN 9783540661559
- [126] SIGINER, D.A.; DE KEE, D. ; CHHABRA, R.P.: *Advances in the Flow and Rheology of Non-Newtonian Fluids*. Elsevier Science, 1999 (Rheology Series). – ISBN 9780080540559

- [127] SIRRINGHAUS, H.; SELE, C. W.; WERNE, T. V. ; RAMSDALE, C.: Manufacturing of organic transistor circuits by solution-based printing. In: KLAUK, H. (Hrsg.): *Organic Electronics, Materials, Manufacturing and Applications*, Wiley-VCH, 2006
- [128] SIRRINGHAUS, H.; KAWASE, T.; FRIEND, R. H.; SHIMODA, T.; INBASEKARAN, M.; WU, W. ; WOO, E. P.: High-Resolution Inkjet Printing of All-Polymer Transistor Circuits. In: *Science* 290 (2000), S. 2123–2126
- [129] SMELA, E.: Conjugated Polymer Actuators for Biomedical Applications. In: *Advanced Materials* 15 (2003), S. 481–494
- [130] SOLEIMANI, M.; MENON, C.: Preliminary investigation of a balloon-shape actuator based on electroactive elastomers. In: *Smart Materials and Structures* 19 (2010)
- [131] SPIEHL, D.; PANKALLA, S.; GLESNER, M. ; DÖRSAM, E.: Analysis of the mobility of printed organic p-channel transistors depending on the transistor geometry and orientation. In: *IV Nanotechnology International Forum (Rusnanotech 2011). Journal of Physics: Conference Series* 345 (2012) 012013, 2011
- [132] STAHL, S.: *Drucktechnologien für das Drucken funktionaler Strukturen*, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, 2009
- [133] STAHL, S.: *Einfluss der Druckform und der Fluidviskosität auf die Schichtdicke von im Tiefdruck hergestellten Funktionsschichten und deren Charakterisierung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2013. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/62346/>
- [134] STAHL, S.; SAUER, H. M. ; DÖRSAM, E.: Development of measurement specifications for rheological tests on fluids for printed electronics. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2010
- [135] STAHL, S.; SAUER, H. M. ; DÖRSAM, E.: Investigation in the homogeneity of gravure printed polymer films for printed electronics. In: *Advances in Printing and Media Technology* Bd. XXXIX. Ljubljana, Slovenia: 39th International Conference of Iarigai, 2012
- [136] STATISTA. DAS STATISTIK-PORTAL: *Anteil der privaten Haushalte in Deutschland mit einem Computer im Zeitraum 1998 bis 2012 (Stand: 1. Quartal 2012)*. <http://www.de.statista.com>, November 2013
- [137] STATISTA. DAS STATISTIK-PORTAL: *Anzahl der Mobilfunkanschlüsse in Deutschland von 1993 bis zum 2. Quartal 2013*. <http://www.de.statista.com>, November 2013
- [138] STRAUSS, K.: Modell der Strömung, die sich am Rakelmesser einer Beschichtungsanlage einstellt. In: *Rheologica Acta* 14 (1975), S. 1058–1065
- [139] STUART, H. A.; KLAGES, G.: *Kurzes Lehrbuch Der Physik*. Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783540890461
- [140] SULLIVAN, T.; KEUNINGS, R.: Use of a Finite-Element Method to Interpret Rheological Effects in Blade Coating. In: *American Institute of Chemical Engineers Journal* 33 (1987), S. 2047–2056

- [141] THE MATHWORKS, INC.: *Image Processing Toolbox*. <http://www.mathworks.de/products/image/>, 2014
- [142] THEOPOLD, A.: *Charakterisierung von Flexodruckformen hinsichtlich der Eignung für die gedruckte Elektronik*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2014
- [143] THEOPOLD, A.; DÖRSAM, E.: Characterization of flexographic printing plates with regard to the field of printed electronics. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Frankfurt-am-Main, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2011
- [144] THEOPOLD, A.; MASSFELDER, D. ; DÖRSAM, E.: Influence of solvents on flexographic printing plates. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Munich, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2012
- [145] THEOPOLD, A.; NEUMANN, J.; MASSFELDER, D. ; DÖRSAM, E.: Effects of solvents on flexographic printing plates. In: *Advances in Printing and Media Technology* Bd. XXXIX. Ljubljana, Slovenia: 39th International Conference of Iarigai, 2012
- [146] THIEME, R.; WILLMANN, J. ; DÖRSAM, E.: Gravure and Flexographic Printing under Controlled Atmosphere - Printing Press and Process. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Munich, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2012
- [147] TONE, R.; BORNEMANN, N.; MECHAU, N.; AL HELWI, M.; SAUER, H. M. ; DÖRSAM, E.: Impedance Spectroscopy as a Tool for the Detection of Mixed Layers in Solution Processed Semiconductors. In: *Large-area, Organic and Printed Electronics Convention (LOPE-C)*. Munich, Germany: OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2012
- [148] TRACTON, A. A. (Hrsg.): *Coating Technology. Fundamentals, Testing, and Processing Techniques*. CRC Press, 2007
- [149] TRECHOW, P.: E-Muskeln statt E-Motoren. In: *VDI Nachrichten* 7 (2012), S. 3
- [150] URBAN, P.; FEDUTINA, M. ; LISSNER, I.: Analyzing small suprathreshold differences of LCD-generated colors. In: *Optical Society of America* 28 (2011), S. 1500–1512
- [151] VAN DEN MEERAKKER, J. E. A. M.; BAARSLAG, P. C.; WALRAVE, W.; VINK, T. J. ; DAAMS, J. L. C.: On the homogeneity of sputter-deposited IT0 films Part II. Etching behaviour. In: *Thin Solid Films* 266 (1995), S. 152–156
- [152] VIVITOUCH HD FEEL. ARTIFICIAL MUSCLE, INC., BAYER MATERIALSCIENCE LLC: <http://www.vivitouch.com>, April 2014
- [153] VOSS, C.: *Analytische Modellierung, experimentelle Untersuchungen und dreidimensionale Gitter-Boltzmann Simulation der quasistatistischen und instabilen Farbspaltung*, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Dissertation, 2002
- [154] WACKER SILICONES: *RTV Silikonkautschuke - Kleben, Abdichten, Vergiessen und Abdichten*. <http://www.wacker.com>, 2013



- [155] WACKER SILICONES: *ELASTOSIL Silikonkautschuk für die Appliance-Industrie*. <http://www.wacker.com>, 2014
- [156] WALLBAUM, R.; KALWEIT, A.; PETERS, S. ; PAUL, C.: *Handbuch Für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung - Entscheidungsgrundlagen Der Produktentwicklung Für Designer und Ingenieure*. Springer, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 9783540214168
- [157] WEINBERG, F.J.: *Optics of Flames: Including Methods for the Study of Refractive Index Fields in Combustion and Aerodynamics*. Butterworths, 1963
- [158] WICKS, Z. W., JR.; JONES, F. N.; PAPPAS, S. P. ; WICKS D. A.: *Organic Coatings. Science and Technology*. Wiley-Interscience, 2007
- [159] WILLERT, C. E.; MITCHELL, D. M. ; SORIA, J.: An assessment of high-power light-emitting diodes for high frame rate schlieren imaging. In: *Experiments in Fluids* Bd. 53. Springer-Verlag, 2012
- [160] WILLMANN, J.: *Innovationen in der druckbaren Elektronik: Von der Idee zur Produktion. Eine technische und wirtschaftliche Analyse*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2012. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3644>
- [161] WINTERMANTEL, E.; HA, S. W.: *Medizintechnik mit biokompatiblen Werkstoffen und Verfahren*. Springer, 2002. – ISBN 9783540412618
- [162] WIRTGEN, J.: Das Ende des PC. Oder auch nicht. In: *c't* 6 (2013), S. 96

## Eigene Veröffentlichungen

URBAN, P., FEDUTINA, M.<sup>1</sup>, LISSNER, I.: *Analyzing small suprathreshold differences of LCD-generated colors*. In: *Journal of the Optical Society of America* 28 (7)(2011), S. 1500-1512

FEDUTINA, M., URBAN, P., DÖRSAM, E.: *Evaluating color-difference in LCD-based soft-proofing*. In: *Advances in Printing and Media Technology* Bd. XXXVIII. Budapest, Hungary: 38th International Research Conference of Iarigai, 2011

FEDUTINA, M., SARKAR, A., URBAN, P., MORVAN, P.: *(How) Do Observer Categories Based on Color Matching Functions Affect the Perception of Small Color Differences?* In: *19th Color and Imaging Conference, San Jose, USA*, 2011

HAAS, M., DÖRSAM, E.: *Mittels Siebdruck und Filmziehen hergestellte dielektrische Elastomeraktoren*. In: *Der Siebdruck (12.2012/01.2013)*, 2013

HAAS, M., SAUER, H. M., DÖRSAM, E.: *Optical Surface Characterization Method of Silicone Layers Used for Manufacturing of Dielectric Elastomer Actuators*. In: *Advances in Printing and Media Technology* Bd. XL. Chemnitz, Germany: 40th International Research Conference of Iarigai, 2013

## Betreute studentische Arbeiten

GLOGNER, F.: *Untersuchungen zur 3D-Kameratechnologien*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2011

MAUTES, A.-L.: *Systematische Suche nach Lösungen für die Herstellung dielektrischer Stapelaktoren*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2012

REINEKE, S. P.: *Gedruckte und organische Elektronik. Herstellung dielektrischer Elastomer-Wandler*. Forschungsseminar, Technische Universität Darmstadt, 2012

REINEKE, S. P.: *Konstruktion einer Labordruckmaschine*. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2012

ARSLANTÜRK, B. K.: *Silikone für taktile Anwendungen: Wichtigste Parameter, Klassifizierung und Charakterisierung*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2012

---

<sup>1</sup>Haas, geb. Fedutina

# A. Grundlegende Kameraeinstellungen

In der vorliegenden Arbeit wird eine optische Charakterisierungsmethode vorgestellt. Für die Umsetzung der Methode werden Digitalkameras verwendet. Diese liegen allerdings nicht im Fokus der Arbeit. Im Folgenden werden die Grundlagen der Kameraeinstellung erläutert, um die bei den Charakterisierungsversuchen verwendeten Einstellungen verständlich zu machen.

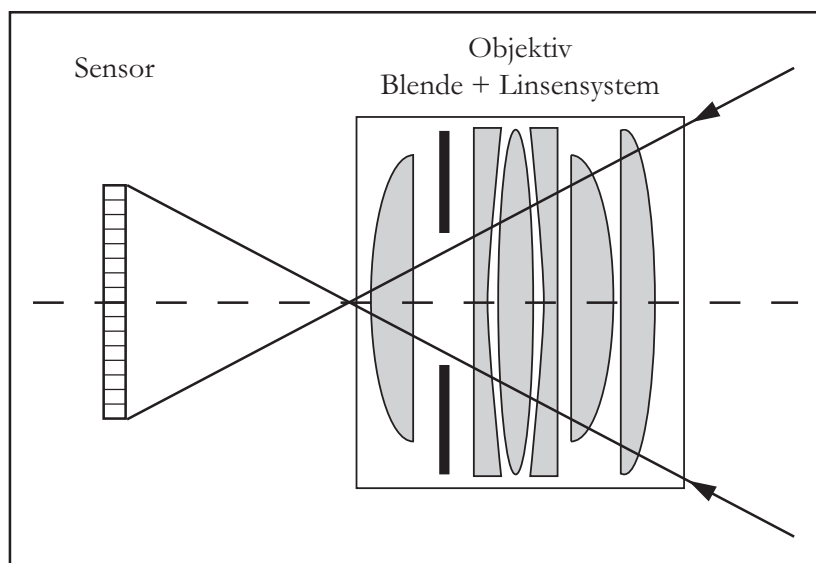


Abbildung A.1.: Vereinfachte schematische Darstellung des Strahlengangs in einer digitalen Kamera. Das Licht geht durch das Objektiv, das mehrere Linsen und eine Blende beinhaltet, zum Sensor.

Abbildung A.1 stellt vereinfacht und schematisch dar, wie der Strahlengang in einer Digitalkamera verläuft. Das Licht wird dabei vom Objektiv zum lichtempfindlichen Sensor geführt. Ein Objektiv beinhaltet ein Linsensystem mit mehreren Linsen, eine einstellbare Blende, und etliche zusätzliche Elemente, die hier nicht betrachtet werden. Ein Bild entsteht durch eine Belichtung des Sensors. Die Belichtung setzt sich aus drei Faktoren zusammen [21]:

1. Blendenöffnung,
2. Belichtungszeit und
3. Lichtempfindlichkeit des Sensors.

Die im Objektiv eingebaute Blende kann nach Bedarf weiter oder enger geöffnet werden. Dabei wird das Verhältnis der Brennweite des Objektivs und des Blendendurchmessers als Blendenzahl bezeichnet [23, 122]:

$$\text{Blendenzahl} = \text{Brennweite} / \text{Blendendurchmesser}$$

## A. Grundlegende Kameraeinstellungen

Die Blendenzahlen bilden zusammen die internationale Blendenreihe:

1,0 1,4 2 2,8 4 5,6 8 11 16 22 32

Eine größere Blendenzahl bedeutet dabei eine kleinere Blendenöffnung und somit einen kleineren Lichtanteil, der an den Sensor gelangt (Blendenöffnung mit Blendenzahl 22 ist kleiner als die mit Blendenzahl 2,8). Niedrige Blendenzahlen führen zu sphärischen Aberrationen und einer geringeren Schärfentiefe. In Fotografie sind diese oft ein erwünschter künstlerischer Effekt. Bei der Kameraverwendung für Messungen gilt es, diese Effekte zu vermeiden, da sie die aufgenommenen Daten (das Foto) unerwünscht beeinträchtigen können.

Um eine Lichtabschwächung bedingt durch eine kleine Blendenöffnung auszugleichen, wird der zweite Parameter - die Belichtungszeit - angepasst. Die Belichtungszeit ist die Zeit, in der der Sensor der Lichteinstrahlung ausgesetzt ist. Je kleiner die Blendenöffnung bzw. je geringer die Beleuchtung des aufzunehmenden Motivs ist, desto längere Belichtungszeit eingestellt werden, um ein gutes Bild zu erhalten. Diese beträgt bei Tagesbeleuchtung gewöhnlich Sekundenteile. Bei bewegten Motiven (Sport, Kinder, Tiere) sind sehr kurze Belichtungszeiten sinnvoll, um ein scharfes Bild zu erzeugen. Bei statischen Aufnahmen können längere Belichtungszeiten eingestellt werden (mehrere Sekunden). Dabei empfiehlt sich die Benutzung eines Kamerastativs, um jegliche Bildverwacklung zu vermeiden. Die Notwendigkeit einer kurzen Belichtungszeit kann auch umgekehrt mit einer weiter geöffneten Blendenöffnung kompensiert werden.

Der letzte aufgeführte Parameter ist die Lichtempfindlichkeit des Sensors. Diese wird in modernen Digitalkameras durch den ISO-Wert bestimmt. Der ISO-Wert empfindet die Lichtempfindlichkeit der analogen Fotofilme nach. Je höher der ausgewählte ISO-Wert ist, desto kürzere Belichtungszeiten können eingestellt werden. Hohe ISO-Werte können je nach Kameramodell ein stärkeres Rauschen verursachen. In diesem Fall ist es das sogenannte Verstärkerrauschen, das beim Auslesen des digitalen Signals vom Sensor entstehen kann [23]. Das Niveau des Verstärkerrauschens hängt sehr stark mit der Qualität der Kameraelektronik zusammen. Bei modernen professionellen Kameramodellen können sehr hohe ISO-Werte [24, 79] ohne den negativen Rauscheinfluss ausgewählt werden.

Im Text der Arbeit werden folgende Kameraeinstellungen dargestellt:

1. Blendenzahl,
2. Belichtungszeit und
3. ISO-Wert.

Ausführliche Informationen zurameratechnik bieten SCHMIDT [122], DEMANT [23] und DANILOWA [21] an.

## B. Technische Daten benutzter Silikone

Technische Daten benutzter Silikone [10, 11, 12, 8]<sup>1</sup>. Falls sich die Werte je nach Komponente unterscheiden, werden diese entsprechend gekennzeichnet.

Eigenschaft	WACKER Elastosil P7670 A/B	WACKER Elastosil PK 16 A/B	WACKER Elastosil RT 625 A/B	NU-SIL CF19- 2186
Mischungsverhältnis	1:1	1:1	9:1	1:1
Dyn. Viskosität, Pa·s	1,8	3,5 <sup>A</sup> ; 4,0 <sup>B</sup>	12	85 <sup>A</sup> ; 65 <sup>B</sup>
Farbe	transp.	transp.	transp.	transp.
Topfzeit bei 23°C, min.	20	40	60	15
Shore-Härte A	7	-	25	25
Shore-Härte 00	55	18	-	-
Zugfestigkeit, $\frac{N}{mm^2}$	1,8	1	6,5	7,6
Reißfestigkeit, %	600	850	600	600
Weiterreißwiderstand, $\frac{N}{mm}$	2,1	3	30	14100

---

<sup>1</sup>Die technischen Quellen sind am Ende des Anhangs aufgelistet.



## C. Zusammengeführte Ergebnisse der Auswertung

Die in der Tabelle unten aufgeführten Werte sind das Ergebnis der Auswertungsphase dieser Arbeit. Um eine Aussage über die Qualität der 78 in unterschiedlichen Herstellungsverfahren und mit variierten Prozessparametern sowie unter Verwendung unterschiedlicher Silikone hergestellten Schichten zu treffen, wurden diese anhand deren Schattenabbildungen ausgewertet. Hierfür wurde eine Probandenstudie durchgeführt, bei der eine visuelle Abmusterung der Schattenabbildung von drei erfahrenen Druckingenieuren erfolgte. Diese bewerteten die Schattenabbildungen bzgl. der drei Kategorien der Inhomogenitäten und des Gesamteindrucks (Gesamtnote, Bewertungsskala: 1 - gut, 2 - mittel, 3 - schlecht). Die über die Probandenanzahl gemittelten Bewertungen sowie die dazugehörigen Standardabweichungen  $\sigma$  sind in den Spalten 5 bis 12 dargestellt. Zusätzlich wurde eine automatisierte Auswertung der Bildinformationen der Schattenabbildungen durchgeführt, bei der der Homogenitätswert  $H$  errechnet wurde. Dieser gibt eine allgemeine Aussage über die Homogenität einer Probe. In der Tabelle ist er in der logarithmischen Form  $\ln H$  dargestellt.

Verfahren	Silikon	variiertes Parameter	ProbeNr.	Kategorie 1: Einschlüsse		Kategorie 2: Bewegungsmerkmale		Kategorie 3: Oberflächenmakromuster		Gesamtnote		$\ln H$
				Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	
FZF	PK 16	50 mm/s	1	2,00	0,00	2,33	0,58	1,33	0,58	2,33	0,58	2,28
			2	2,33	1,15	1,67	1,15	1,67	0,58	2,67	0,58	1,62
			3	1,33	0,58	2,33	0,58	2,00	1,00	2,33	0,58	1,72
		100 mm/s	4	2,33	0,58	2,00	1,00	1,67	0,58	2,67	0,58	2,37
			5	1,67	0,58	2,00	0,00	1,33	0,58	2,00	0,00	1,78
			6	2,00	0,00	1,33	0,58	1,67	1,15	2,33	0,58	1,45
		150 mm/s	7	1,67	0,58	2,33	0,58	2,00	1,00	2,00	0,00	1,62
			8	2,00	1,00	2,00	1,00	1,33	0,58	2,67	0,58	1,80
			9	1,67	0,58	2,67	0,58	1,67	0,58	2,33	0,58	1,68
	RT625	50 mm/s	10	2,33	1,15	3,00	0,00	1,33	0,58	3,00	0,00	2,46
			11	2,33	0,58	2,33	0,58	1,67	0,58	2,67	0,58	1,96
			12	2,00	0,00	2,33	0,58	1,67	0,58	2,67	0,58	1,98
		100 mm/s	13	2,00	0,00	1,67	1,15	1,00	0,00	2,00	0,00	1,91
			14	1,67	0,58	2,00	0,00	1,67	0,58	2,00	0,00	2,15
			15	2,67	0,58	2,00	0,00	2,00	1,00	2,67	0,58	2,35
			16	1,67	1,15	1,33	0,58	2,33	1,15	2,33	0,58	2,03

Verfahren	Silikon	variiertes Parameter	ProbeNr.	Kategorie 1: Einschlüsse		Kategorie 2: Bewegungsmerkmale		Kategorie 3: Oberflächenmakromuster		Gesamtnote		$\ln H$
				Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	
	P7670	150 mm/s	17	2,33	0,58	2,33	0,58	1,33	0,58	2,33	0,58	1,96
			18	2,00	0,00	2,33	0,58	1,67	0,58	2,33	0,58	2,35
			19	2,00	1,00	1,33	0,58	2,00	1,00	2,33	0,58	1,96
			20	2,00	0,00	2,00	0,00	1,00	0,00	2,00	0,00	2,32
		50 mm/s	21	1,33	0,58	2,67	0,58	1,67	1,15	2,67	0,58	1,97
			22	1,33	0,58	2,00	0,00	1,67	0,58	2,00	0,00	1,73
			23	1,33	0,58	2,00	0,00	1,67	0,58	2,00	0,00	2,27
			24	1,33	0,58	1,67	0,58	1,67	0,58	2,00	0,00	1,85
		100 mm/s	25	1,67	1,15	2,33	0,58	2,33	1,15	2,33	0,58	2,29
			26	1,33	0,58	1,67	0,58	2,00	1,00	2,00	0,00	1,90
			27	2,00	1,00	2,00	1,00	1,33	0,58	2,00	0,00	1,41
			28	2,00	1,00	2,67	0,58	2,00	1,00	2,67	0,58	2,39
		150 mm/s	29	1,67	0,58	2,00	1,00	1,67	0,58	2,00	0,00	1,96
			30	1,67	0,58	2,33	0,58	1,67	0,58	2,33	0,58	2,05
FZR	PK 16	-	31	2,67	0,58	1,67	0,58	3,00	0,00	2,67	0,58	1,88
			32	2,33	0,58	1,67	0,58	2,67	0,58	2,67	0,58	2,33
			33	2,67	0,58	1,67	0,58	2,67	0,58	2,67	0,58	1,88
			34	2,67	0,58	1,67	0,58	2,33	0,58	2,33	0,58	2,26
	RT625	-	35	3,00	0,00	1,33	0,58	1,67	0,58	2,33	0,58	2,10
			36	3,00	0,00	1,33	0,58	2,33	0,58	2,67	0,58	2,31
			37	3,00	0,00	1,67	0,58	2,00	0,00	2,67	0,58	2,41
			38	2,33	0,58	1,33	0,58	2,00	0,00	2,33	0,58	1,99
	P7670	-	39	2,33	0,58	3,00	0,00	1,67	1,15	2,67	0,58	2,09
			40	1,67	1,15	3,00	0,00	1,67	0,58	2,67	0,58	2,05
			41	2,00	1,00	3,00	0,00	1,67	0,58	2,67	0,58	1,97
			42	1,67	0,58	3,00	0,00	1,00	0,00	2,67	0,58	2,06
	CF-19	-	43	3,00	0,00	2,33	1,15	3,00	0,00	3,00	0,00	2,22
			44	3,00	0,00	2,00	1,00	1,67	1,15	2,67	0,58	2,22
			45	2,67	0,58	2,33	0,58	2,67	0,58	2,67	0,58	2,45
			46	2,67	0,58	2,00	1,00	1,67	1,15	2,67	0,58	2,49
	PK 16	feines Sieb	47	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,97
			48	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,89
			49	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,07
			50	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,42
			51	1,67	0,58	1,00	0,00	1,33	0,58	1,33	0,58	2,12
			52	1,67	0,58	1,33	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,24

grobes Sieb



Verfahren	Silikon	variiertes Parameter	ProbeNr.	Kategorie 1: Einschlüsse		Kategorie 2: Bewegungsmerkmale		Kategorie 3: Oberflächenmakromuster		Gesamtnote		$\ln H$
				Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	Bewertung	$\sigma$	
			53	1,67	0,58	1,33	0,58	1,33	0,58	1,33	0,58	1,38
			54	1,67	0,58	1,33	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,22
	RT625	feines Sieb	55	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,55
			56	1,33	0,58	1,33	0,58	1,33	0,58	1,00	0,00	1,62
			57	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,62
			58	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,11
		grobes Sieb	59	2,33	1,15	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00	1,00	1,96
			60	2,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00	1,00	1,90
			61	2,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,67	0,58	1,85
			62	2,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,60
	P7670	feines Sieb	63	2,00	0,00	1,33	0,58	1,00	0,00	1,67	0,58	1,99
			64	1,33	0,58	1,33	0,58	1,33	0,58	1,67	0,58	2,05
			65	2,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00	0,00	1,96
			66	2,67	0,58	1,33	0,58	1,00	0,00	2,33	0,58	1,93
		grobes Sieb	67	2,67	0,58	1,33	0,58	1,33	0,58	2,67	0,58	2,16
			68	2,67	0,58	1,00	0,00	1,33	0,58	1,67	0,58	2,00
			69	2,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,67	0,58	1,58
			70	2,33	0,58	1,00	0,00	1,33	0,58	1,67	0,58	1,63
	CF-19	feines Sieb	71	1,67	0,58	1,33	0,58	1,00	0,00	1,33	0,58	1,81
			72	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,11
			73	1,33	0,58	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,99
			74	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,28
		grobes Sieb	75	2,00	1,00	1,00	0,00	1,33	0,58	1,33	0,58	1,67
			76	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,33	0,58	2,14
			77	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,63
			78	1,67	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,85

### *C. Zusammengeführte Ergebnisse der Auswertung*

## D. Technische Daten benutzter Gerätschaften

### D.1. LED

Technische Spezifikation benutzter LEDs [6, 7]<sup>1</sup>

Bezeichnung	Farbe	Strahlenmuster	Typische Spitzenwellenlänge, nm	Spektrale Halbwertsbreite, nm
LUXEON STAR	Königsblau	Lambertisch	455	20
LUXEON REBEL	Grün	Lambertisch	530	30

### D.2. Digitale Spiegelreflexkameras

Technische Spezifikation benutzter digitaler Spiegelreflexkameras [3, 4]

Eigenschaft	Canon EOS 450D	Canon EOS 5D MK II
max. Auflösung, Pix	$4.227 \times 2.848$	$5.616 \times 3.744$
Farbtiefe in RAW-Format, bit	42	42
C-MOS-Sensor	$22,2 \times 14,8$ mm, 12,2 MPix	$36 \times 24$ mm, 21,1 Mpix
ISO-Bereich	100 – 1600	100 – 25600
Belichtungszeiten, s	1/4000 – 30	1/8000 - 30

### D.3. Siebdruckmaschine Kammann K15Q SL

Das KAMMANN Siebdruckwerk K15Q SL ist für das Bedrucken von flachen Substraten mit mittel- und hochviskosen Fluiden geeignet. Es ist mit einem gesinterten Vakuumtisch zur Substratbefestigung ausgestattet. Variierbare Parameter sind [5]:

- Rakelwinkel
- Rakeldruck

---

<sup>1</sup>Die technischen Quellen sind am Ende des Anhangs aufgelistet.

- Absprung
- Druckgeschwindigkeit: 0,1 – 1,0 m/s
- Bedruckbare Fläche:  $120 \times 120 \text{ mm}^2$

## D.4. Filmziehgerät Zehntner ZAA 2300

Technische Daten zum automatischen Filmziehgerät ZAA 2300 [13]

- Substrate: Flexible Folien, Papier, biegesteife Materialien wie Blech oder Glas
- Geschwindigkeiten: 0,005 – 0,5 m/s
- Verstellbare Anfangs- und Endschläge

## D.5. IR-Strahler Elstein HTS/2

Technische Daten zum IR-Strahler ELSTEIN HTS/2 [2]

Leistung, W	500
Typische Betriebstemperatur, °C	860
Maximal zulässige Temperatur, °C	900
Wellenlängenbereich, $\mu\text{m}$	2 – 10

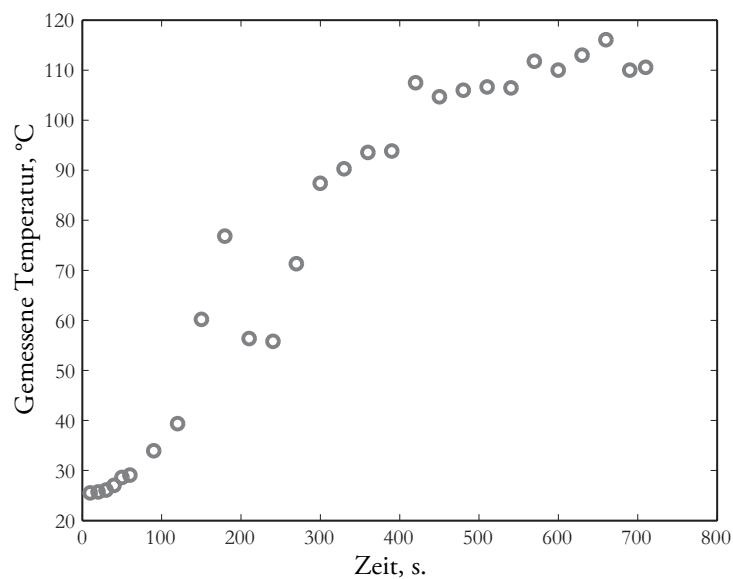


Abbildung D.1.: Oberflächentemperatur, gemessen unter dem IR-Strahler (Abstand 123 mm), in Abhängigkeit von Zeit.

## **D.6. Umlufttrockner Vötsch VTL 60/90**

Technische Daten zum Umlufttrockner Vötsch VTL 60/90 [9]

- Turbulente Umströmung im Innenraum
- Nenntemperatur: 250 °C
- Temperaturbegrenzer: 350 °C
- Mindestabluft-Volumenstrom: 138 m<sup>3</sup>/h
- Innenmaße B/H/T: 600/900/600 mm

## **D.7. Coatema Smartcoater SC07**

Technische Daten zum COATEMA Smartcoater SC07 [1]

- Maße L/B/H: 2500/850/1800 mm
- Gesamtgewicht: ca. 450 kg
- Arbeitsbreite: 100 mm
- Durchmesser Beschichtungswalze: 100 mm
- Geschwindigkeit: 0,1 – 1,0 m/min
- Trockner Typ: Heißluft, Oberluft
- Temperatur Trockner: max. 235 °C
- Abluftvolumenstrom Trockner: 350 m<sup>3</sup>/h
- Leistung Trockner: 9 kW
- Maße Trockner L/B: 500/305 mm



# Technische Quellen zum Anhang

- [1] COATEMA COATING MACHINERY GMBH: *Technische Daten - Smartcoater SC07*
- [2] ELSTEIN: *Keramische Infrarotstrahler. Katalog*
- [3] [HTTP://WWW.DIGITALKAMERA.DE](http://www.digitalkamera.de): *Datenblatt für Canon EOS 450D*, September 2013
- [4] [HTTP://WWW.DIGITALKAMERA.DE](http://www.digitalkamera.de): *Datenblatt für Canon EOS 5D Mark II*, September 2013
- [5] KAMMANN MASCHINENBAU GMBH: *K15QSL. Technische Beschreibung und Betriebsanleitung*, 2011
- [6] LUXEON: *Hochleistungslichtquelle Luxeon Star. Technisches Datenblatt DS23*.
- [7] LUXEON: *LUXEON Rebel and LUXEON Rebel ES. Color Portfolio. Technisches Datenblatt*.
- [8] NUSIL TECHNOLOGY LLC: *CF19-2186. Technisches Datenblatt*
- [9] VÖTSCH INDUSTRIE TECHNIK: *Trockner für Beschichtungsstoffe VTL 60/90. Betriebsanleitung*, 2010
- [10] WACKER SILICONES: *ELASTOSIL P7670 A / B. Technisches Datenblatt*
- [11] WACKER SILICONES: *ELASTOSIL PK 16 A / B. Technisches Datenblatt*
- [12] WACKER SILICONES: *ELASTOSIL RT 625 A / B. Technisches Datenblatt*
- [13] ZEHNTNER TESTING INSTRUMENTS: *ZAA 2300 Automatisches Filmziehgerät*, 2013